

УДК 623.55.02



О. Ю. Іохов



В. Г. Малюк



Є. О. Каплун

### **АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ЗОНИ ЗАВАДОСТІЙКОЇ РОБОТИ РАДІОКАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ UHF / VHF ДІАПАЗОНУ В УМОВАХ РОБОТИ СИСТЕМИ ДЖЕРЕЛ РАДІОПРИДУШЕННЯ, РОЗТАШОВАНИХ НА РІЗНИХ ВИСОТАХ**

*Запропоновано метод визначення меж максимальної за розміром зони стійкого радіоприйому в діапазоні UHF / VHF для мобільних засобів радіозв'язку в умовах дії системи радіоперешкод.*

*Сформульовано задачу визначення меж зони стійкого радіообміну засобів мобільного радіозв'язку, які використовують направлені антени в умовах реальних перешкод, у вигляді пошуку одиночної ізоляції в скалярному полі. Для визначення координат точок карти, що належать ізоляції, пропонується модифікація хвильового алгоритму, яка відрізняється невисокою трудомісткістю і однозначністю отриманих результатів.*

*К л ю ч о в і с л о в а: радіоелектронний захист, перешкодозахищеність, хвильовий алгоритм, ізоляція*

**Постановка проблеми.** У наш час у тактичних ланках управління частинами та підрозділами правоохоронних органів України широко застосовуються радіоелектронні засоби (РЕЗ) малої потужності VHF/UHF діапазону. Такі радіозасоби мають достатню номенклатуру, яка задовольняє потреби системи тактичного радіозв'язку, але не відповідає вимогам щодо забезпечення інформаційного захисту, зокрема від впливу навмисних завад (НЗ). Сучасні засоби постановки НЗ мають якісні характеристики, які дозволяють залишатися непомітними, навіть якщо вони знаходяться поруч з противником, що робить можливим одночасно блокувати доступ до радіообміну та порушувати цілісність повідомлень [1]. Досвід виконання службово-бойових завдань останніх років показав, що штатні радіозасоби VHF/UHF діапазону, які є на озброєнні правоохоронних органів, недостатньо захищені від впливу засобів постановки НЗ [2, 3].

Аналогічними завданнями у цивільній сфері є захист засобів мобільного радіозв'язку VHF діапазону, офісних і промислових мереж від індустриальних радіоперешкод, перешкод від повітряних ліній електропередачі і високовольтного устаткування [4, 6].

Для забезпечення роботи радіомереж VHF/UHF діапазону в умовах радіопридушення необхідне вдосконалення наукових засад та технічних засобів підвищення стійкості радіоприйому в мережах зв'язку.

Таким чином, плануючи військові операції, створюючи офісні та промислові мережі, бажано мати метод визначення меж зони завадостійкого радіообміну, в межах якої забезпечується якісний рівень радіозв'язку. У розрахунках необхідно враховувати частотне територіальне рознесення елементів радіосистем, можливість використання екранів і спрямованих антенних систем для захисту засобів радіообміну від впливу завад.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Існуючі потужні комерційні системи для планування РЕБ, наприклад, HTZ WARFARE компанії ATDI [7], дозволяють вирішувати задачі розрахунку покриття, розрахунку інтерференцій, EMC та оптимізації розташування станцій придушення [5]. Разом з тим такі програмні продукти мають високу вартість, закритість програмного забезпечення, надмірність функцій щодо часткової задачі, яка досліджується. Тому бажано отримати простий і ефективний метод обчислення меж максимальної за розміром зони стійкого радіоприйому в діапазоні UHF / VHF для мобільних засобів радіозв'язку в умовах дії системи радіоперешкод.

Відомо, що всі технічні способи підвищення стійкості інформаційного обміну за наявності перешкод засновані на внесенні надмірності в корисний сигнал [8]. Така надмірність може бути забезпечена за рахунок збільшення:

- часу передачі;
- ширини спектра сигналу;
- відношення сигнал/шум на вході приймального пристрою.

В силу доступних організаційних і технічних можливостей оперативне маніпулювання першими двома показниками можна вважати обмеженим. Розглянемо можливість використання третього фактора.

За заданих вимог до стійкості радіообміну для кожного радіоприймача завжди можна однозначно вказати граничне (порогове) відношення сигнал / перешкода ( $SNR_{min}$ ) на вході тракту прийому [9]. Це дозволяє як об'єктивну оцінку рівня захисту від перешкод взяти коефіцієнт придушення за потужністю корисного сигналу перешкодою

$$K_{sup} = \frac{1}{SNR} = \frac{P_N}{P_s}, \quad (1)$$

де  $P_N$  та  $P_s$  – відповідно потужність сигналу перешкоди та корисного сигналу на вході приймача.

Перешкода вважається допустимою, якщо виконується нерівність

$$K_{sup} \leq K_{th}, \quad (2)$$

де  $K_{th} = \frac{1}{SNR_{min}}$  – граничне значення, що залежить від виду перешкоди і сигналу, умов їх взаємодії і способу обробки суми сигналу і перешкоди.

Якщо  $\Omega$  – область на карті, в якій можуть розташовуватися об'єкти радіообміну, то зоною завадостійкого радіообміну можна вважати область  $\Omega_s \in \Omega$ , в будь-якій точці якої виконується співвідношення (2):

$$\Omega_s = \left\{ \forall (x, y) \in \Omega \mid K_{sup} \leq K_{th} \right\}. \quad (3)$$

Відповідно завдання збільшення розмірів зони (3) можна записати як задачу максимізації коефіцієнта покриття області на карті

$$K_{cov} = \frac{\Omega_s}{\Omega} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Розглянемо відомі підходи до виконання завдань (3) та (4) обчислення меж і збільшення розмірів області  $\Omega_s$ .

У праці [10] наведено аналітичний метод визначення меж зони для схеми утворення радіоперешкод, наведеної на рис. 1.

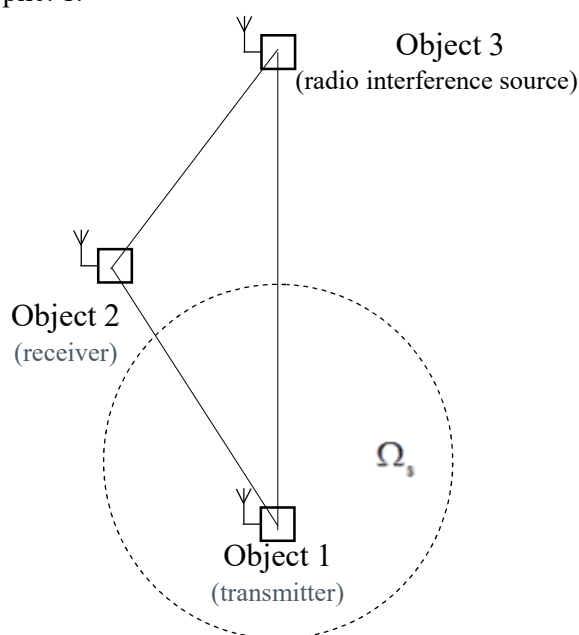


Рисунок 1 – Схема утворення радіоперешкод

Отримано коефіцієнт придушення (1) корисного сигналу передавача на вході приймача у такому вигляді:

$$K_{\text{sup}} = \frac{P_N}{P_S} = \frac{P_3 G_{32} G_{23} \eta_N R_{12}^2}{P_1 G_{12} G_{21} R_{23}^2}, \quad (5)$$

де  $P_1$  – еквівалентна ізотропно випромінювана потужність передавача корисного радіосигналу;

$P_3$  – еквівалентна ізотропно випромінювана потужність передавача перешкоди;

$G_{12}$  та  $G_{21}$  – відповідно коефіцієнти посилення антен передавача радіосигналу в напрямку на приймач і приймальні антени в напрямку на радіопередавач;

$G_{32}$  та  $G_{23}$  – відповідно коефіцієнти посилення антен передавача перешкоди в напрямку на приймач і приймальні антени в напрямку на передавач перешкоди;

$R_{12}$  – довжина траси поширення корисного радіосигналу;

$R_{23}$  – довжина траси поширення радіоперешкоди;

$\eta_N \leq 1$  – коефіцієнт, що враховує різницю поляризації сигналу і перешкоди.

Показано, що форма області  $\Omega_s$  залежить переважно від співвідношення потужності передавачів  $P_1$  та  $P_3$  (рис. 2).

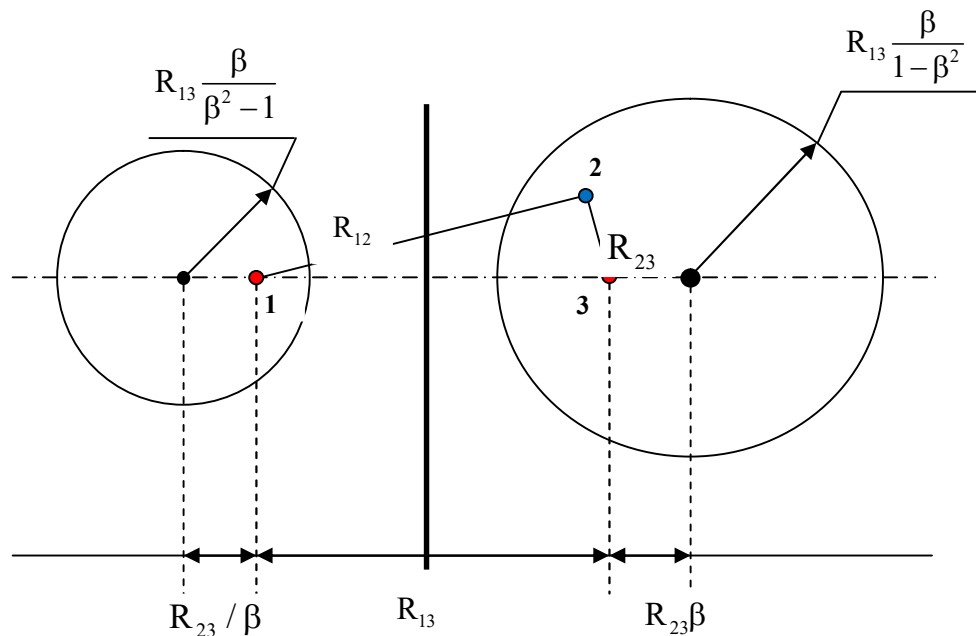


Рисунок 2 – Аналітичний метод визначення зони  $\Omega_s$

З формули (5) можна одержати

$$R_{23} = R_{12} \sqrt{\frac{P_3 G_{32} G_{23} \eta_N}{P_1 G_{12} G_{21} K_{\text{sup}}}} = R_{12} \sqrt{\frac{P_3}{P_1 K_{\text{sup}}}} = R_{12} \sqrt{\beta}. \quad (6)$$

Якщо  $\beta < 1$ , тобто коли енергетичний потенціал джерела перешкод невеликий, зона завадостійкого прийому – це вся площа, крім зони придушення, кола радіусом

$$R = R_{13} \frac{\beta}{1 - \beta^2}, \quad (7)$$

де  $R_{13}$  – відстань між передавачем сигналу і джерелом перешкоди. Центр зони придушення для випадку  $\beta < 1$  зміщений на  $R_{23}\beta$  від передавача сигналу в напрямку базової лінії, яка з'єднує передавачі сигналу і перешкоди (рис. 2, коло праворуч).

Якщо  $\beta > 1$ , тобто коли енергетичний потенціал джерела перешкод перевищує потужність передавача сигналу, зона завадостійкого прийому – це коло радіусом

$$R = R_{13} \frac{\beta}{\beta^2 - 1} \quad (8)$$

з центром, зміщеним відносно точки розташування передавача сигналу в сторону, протилежну напрямку на джерело радіоперешкод на  $\frac{R_{23}}{\beta}$  (рис. 2, коло зліва).

У випадку  $\beta = 1$  межа між зонами придушення і завадостійкого прийому буде проходити посередині між передавачем сигналу і джерелом радіоперешкод.

В рамках розглянутого вище узагальненого підходу автори не розглядали можливість збільшення кількості джерел перешкод. Також не враховувалася можливість оптимальної орієнтації діаграми направленості (ДН) антени приймача, що істотно впливає на форму і розміри області  $\Omega_s$ . Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з принциповою неможливістю врахування форми цифрованої ДС антени приймача у використовуваному аналітичному підході.

Разом з тим аналіз співвідношення (5) дозволяє дійти висновку, що максимізація розмірів області у задачі (4) за рахунок збільшення потужності джерела корисного сигналу обмежена апаратними можливостями передавача та умовами прийому. Перспективним напрямком є поліпшення характеристик ДС антен передавача і приймача, що, як показує практика, дозволяє істотно збільшити розміри сфери завадостійкого радіообміну. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути чисельний підхід.

Саме такий підхід використаний у статті [11] для визначення меж області (2) за умов дії кількох наземних джерел адитивних, зосереджених за частотою радіоперешкод  $Z_1, \dots, Z_k$  (рис. 3). Передбачалося, що антена передавача мала ненаправлену ДН, випромінювання джерел радіоперешкод також мало ненаправлений характер. Отримано коефіцієнт придушення (1) корисного сигналу передавача на вході приймача з двовимірною цифровою ДН направленої антени у такому вигляді:

$$K_{\text{sup}} = \frac{R_{12}^2}{P_1 G_2 (\theta_{21} - \theta_2)} \sum_{i=1}^k \frac{P_{3_i} G_2 (\theta_{23_i} - \theta_2)}{R_{23_i}^2}, \quad (9)$$

де  $\theta_{21}$  – азимут антени приймача на передавач сигналу;

$\theta_2$  – власний азимут антени приймача сигналу;

$P_{3_i}$  – потужність і-го джерела радіоперешкод;

$R_{23_i}$  – відстань від антени приймача до і-го джерела радіоперешкод;

$\theta_{23_i}$  – азимут антени приймача на і-те джерело радіоперешкод.

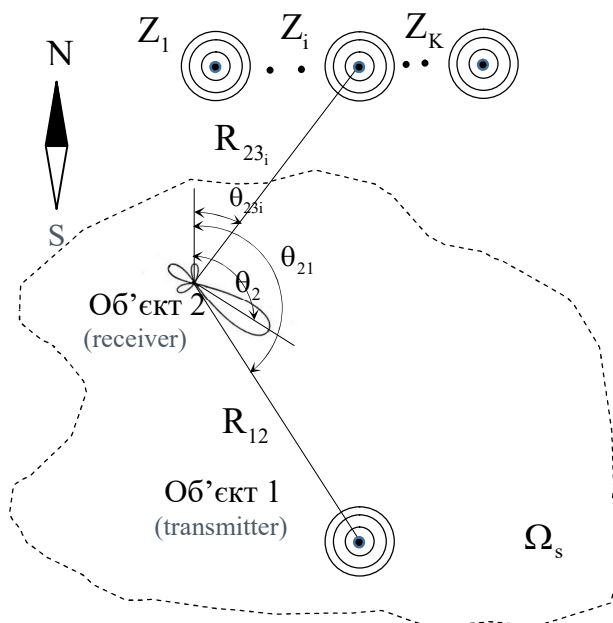


Рисунок 3 – Застосування направленої антени приймача для захисту від перешкод

Показано, що мінімізацію коефіцієнта придушення для приймача, що знаходиться в точці  $(x, y)$ , можна забезпечити шляхом вибору оптимального кута азимута  $\theta_2^*$  ДН направленої антени приймача:

$$K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*) \rightarrow \min. \quad (10)$$

Використання чисельного підходу дає можливість визначити значення коефіцієнта придушення (9) як функцію просторових координат  $K_{\text{sup}}(x, y)$ , якщо відомі параметри розміщення і властивості об'єктів радіообміну. Тому у статті [11] задача визначення меж області (3) сформульована як пошук точок лінії рівня  $K_{\text{th}}$  у скалярному полі (ізолінії)

$$I_{K_{\text{th}}} = \{(x, y) | K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*) = K_{\text{th}}\}. \quad (11)$$

Аналіз існуючих методів та підходів до обчислення ліній рівня (ізоліній) для функцій, визначених на двовимірній площині, дає можливість сформулювати такі висновки [12].

1. Сучасний принцип інтерактивності, який накладає жорсткі обмеження на час виконання програми, робить для задачі комп'ютерної візуалізації ліній рівня (11) процедуру повного перебору неприйнятною.

2. Відомі алгоритми, що застосовуються у різноманітних пакетах прикладних програм (MatLab, MatCAD, Beta-Soft і т. д.), не можуть використовуватися у вітчизняних програмних комплексах, оскільки алгоритми їх реалізації не є доступними, неможливо масштабувати область візуалізації у пропорціях, адекватних реальним.

3. Найбільш популярним з існуючих алгоритмів візуалізації двовимірних скалярних полів у вигляді ліній рівня є алгоритм крокуючих квадратів (Marching Squares) [13]. Його перевагою є універсальність. До недоліків слід віднести необхідність обчислення значень поля в усіх вузлах вихідної регулярної сітки, наявність неоднозначних випадків під час класифікації фрагментів ізолінії та проблеми забезпечення замкнутості контуру ізолінії.

Для визначення сукупності точок ізолінії (11) у статті [11] застосована модифікація хвильового алгоритму, умовою поширення хвилі був критерій (1). При цьому передбачалося, що в кожній точці фронту хвилі антена приймача орієнтована за азимутом на передавач сигналу. Показано, що отримана в результаті область має істотно більші розміри, порівнюючи з варіантом застосування ненаправленої антени для приймача. Область має неправильну форму, залежить від співвідношення потужності джерел сигналу і перешкод, а також від характеристик ДН антени приймача.

Недоліком методу, запропонованого у статті [11], є використання в моделі радіообміну двовимірної ДН направленої антени приймача. Це погіршує результати, одержувані у випадку роботи з джерелами перешкод, розташованих на висоті. Врахування тривимірних властивостей ДН антенного пристрою приймача дозволить більш ефективно розв'язати задачу (11) в умовах дії перешкод, джерела яких розташовані на різних висотах.

**Метою статті** є розроблення швидкого і адекватного методу визначення меж зони завадостійкого радіообміну засобів радіозв'язку UHF / VHF діапазону, у яких використовують направлені антени.

**Виклад основного матеріалу.** Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання.

1. Удосконалити модель каналу радіозв'язку UHF / VHF діапазону в умовах впливу системи джерел електромагнітних перешкод, розташованих на різних висотах, з можливістю орієнтації антени приймача по азимуту та куту місця.

2. Запропонувати чисельний метод визначення меж максимальної зони завадостійкого радіообміну, у якому використано вдосконалену модель каналу радіозв'язку, і який відрізняється однозначністю і невисокою трудомісткістю.

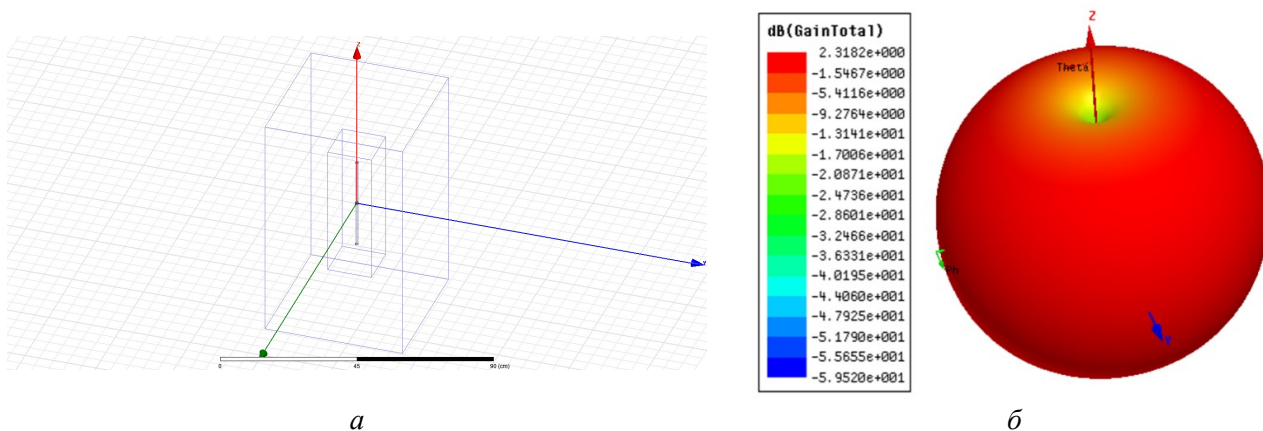
3. Оцінити ефективність отриманих результатів.

**Модель каналу радіозв'язку UHF / VHF діапазону в умовах впливу системи перешкод**

*Тривимірні діаграми направленості антенних пристроїв.*

Для побудови удосконаленої моделі каналу радіозв'язку UHF / VHF діапазону [15] необхідно обчислити просторову функцію напруженості поля антенного пристрою в полярних координатах

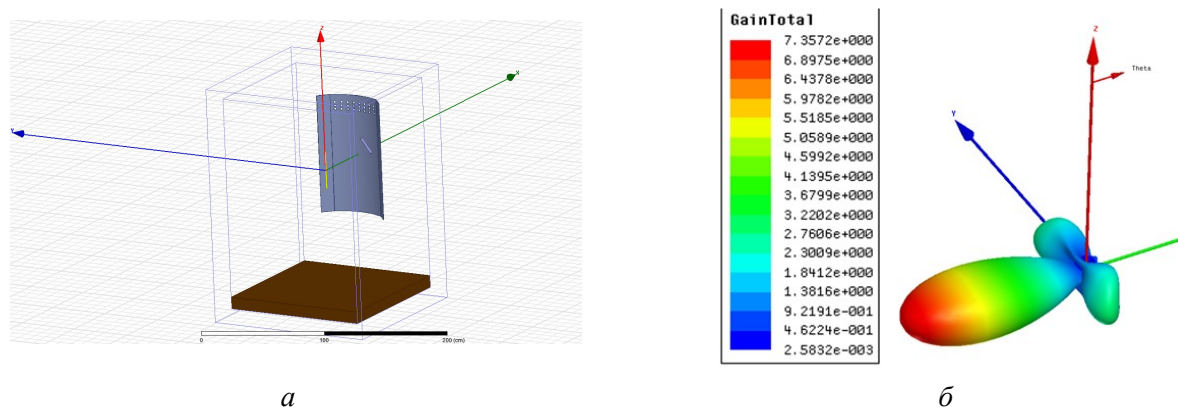
$G(\theta, \varphi)$ , де  $\theta$  – кут азимута, а  $\varphi$  – кут місця. Форму ДН антенної системи за наявності відповідних креслень можна обчислити за допомогою програмних засобів моделювання тривимірних електромагнітних полів, таких як HFSS Ansoft [7]. На рис. 4 наведено взятий з монографії [12] приклад розрахунку ненаправленої ДН дипольної антени, виконаний у програмі HFSS Ansoft.



*a* – зображення моделі дипольної антени, розміщеної у боксі;  
*б* – форма ДН ненаправленого антенного пристрою

Рисунок 4 – Розрахунок ДН для дипольної антени

Як направлену антену можна використати будь-яку замасковану конструкцію, до складу якої входить екран, що задає відповідну форму ДН. На рис. 5 наведено приклад розрахунку ДН направленої антенної пристрою, що складається з дипольної антени радіостанції Kenwood ТК-2270 і металевого екрана.



*a* – зображення моделі дипольної антени, розміщеної у боксі;  
*б* – форма ДН направленої антенної пристрою

Рисунок 5 – Розрахунок ДН для дипольної антени, забезпеченої екраном

Часто для опису ДН використовуються її нормовані перетини  $D_g(\theta), \theta \in [0^\circ, 360^\circ]$  і  $D_v(\varphi), \varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$  у горизонтальній і вертикальній площинах відповідно. В цьому випадку тривимірну нормовану ДН антенного пристрою можна отримати таким чином:

$$G(\theta, \varphi) = D_g(\theta) * D_v(\varphi). \tag{12}$$

Надалі вважатимемо, що приймачі сигналу можуть бути забезпечені направленим антенним пристроєм з цифровою тривимірною ДН.



*Коефіцієнт придушення як функція просторових координат.*

Визначимо характеристики та параметри об'єктів у оперативній ситуації, наведеній на рис. 3.

Об'єкт 1 – передавач сигналу потужністю  $P_1$  з ненаправленою антеною в точці з координатами  $(x_1, y_1, z_1)$ . Нормована ДН антени передавача описується функцією  $G_1(\theta, \varphi) = 1$ .

Об'єкт 2 – приймач сигналу з направленою антеною в точці з координатами  $(x_2, y_2, z_2)$ . Нормована ДН антени передавача описується функцією  $G_2(\theta, \varphi)$ , одержаною розрахунковим шляхом.

Об'єкт 3 – система джерел радіоперешкод  $S_i(x_3, y_3, z_3, P_3)$ ,  $i = 1, \dots, K$  відповідними координатами  $i$  потужністю випромінювання. Випромінювання джерел радіоперешкод має ненаправлений характер, тому  $G_3(\theta, \varphi) = 1$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Згідно з формулою (9) коефіцієнт придушення з урахуванням тривимірної ДН антени приймача можна визначити як

$$K_{\text{sup}} = \frac{R_{12}^2}{P_1 G_2(\theta_{21} - \theta_2, \varphi_{21} - \varphi_2)} \sum_{i=1}^K \frac{P_3 G_2(\theta_{23_i} - \theta_2, \varphi_{23_i} - \varphi_2)}{R_{23_i}^2}, \quad (13)$$

де  $R_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$  – відстань від передавача до приймача;

$\theta_{21} = \arctan \left[ \frac{|x_2 - x_1|}{|y_2 - y_1|} \right]$  – азимут від приймача на передавач;

$\varphi_{21} = \arctan \left[ \frac{|z_1|}{R_{12}} \right]$  – кут місця від приймача на передавач;

$R_{23_i} = \sqrt{(x_2 - x_{3_i})^2 + (y_2 - y_{3_i})^2 + (z_2 - z_{3_i})^2}$  – відстань від передавача до  $i$ -го джерела радіоперешкод;

$\theta_{23_i} = \arctan \left[ \frac{|x_2 - x_{3_i}|}{|y_2 - y_{3_i}|} \right]$  – азимут від приймача на  $i$ -те джерело радіоперешкод;

$\varphi_{23_i} = \arctan \left[ \frac{|z_{3_i}|}{R_{23_i}} \right]$  – кут місця від приймача на  $i$ -те джерело радіоперешкод;

$\theta_2, \varphi_2$  – свій азимут і кут місця направленої антени приймача.

Співвідношення (13) дає можливість розрахувати коефіцієнт придушення в будь-якій точці оперативного простору. Приклад розрахунку скалярного поля для ненаправленої антени приймача ( $G_2(\theta, \varphi) = 1$ ) наведено на рис. 6.

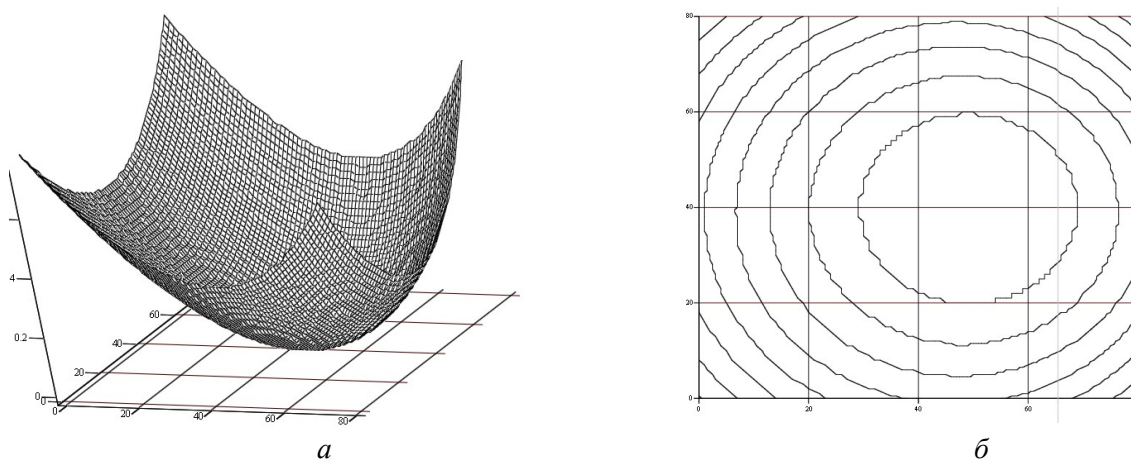


Рисунок 6 – Функція просторових координат  $K_{\text{sup}}(x, y)$  для випадку ненаправленої антени приймача

Для направленої антени приймача, якщо задані потужності передавача і джерел перешкод, умова завадостійкої роботи (1) у точці з координатами  $(x, y)$  залежить, в основному, від орієнтації антени:

$$K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2, \varphi_2) \leq K_{\text{th}} \quad (14)$$

З метою більш повного захисту радіообміну, порівнюючи із завданням, розглянутим у статті [11], пропонується обчислювати оптимальний азимут  $\theta_2^*$  та оптимальний кут місця  $\varphi_2^*$  направленої антени системи, тобто

$$\theta_2^*, \varphi_2^* = \arg \min_{\theta_2 \in \Theta, \varphi_2 \in \Phi} K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2, \varphi_2), \quad (15)$$

де  $\Theta = [0^\circ, 360^\circ]$ ,  $\Phi = [-90^\circ, 90^\circ]$ .

Невелика розмірність задачі (15) дає можливість її розв'язування методом простого перебору.

Оптимальна орієнтація антенної системи приймача за азимутом і кутом місця істотно змінює форму поверхні функції просторових координат  $K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*, \varphi_2^*)$ . На рис. 7 наведені результати розрахунку вищенаведеного прикладу з урахуванням співвідношення (15).

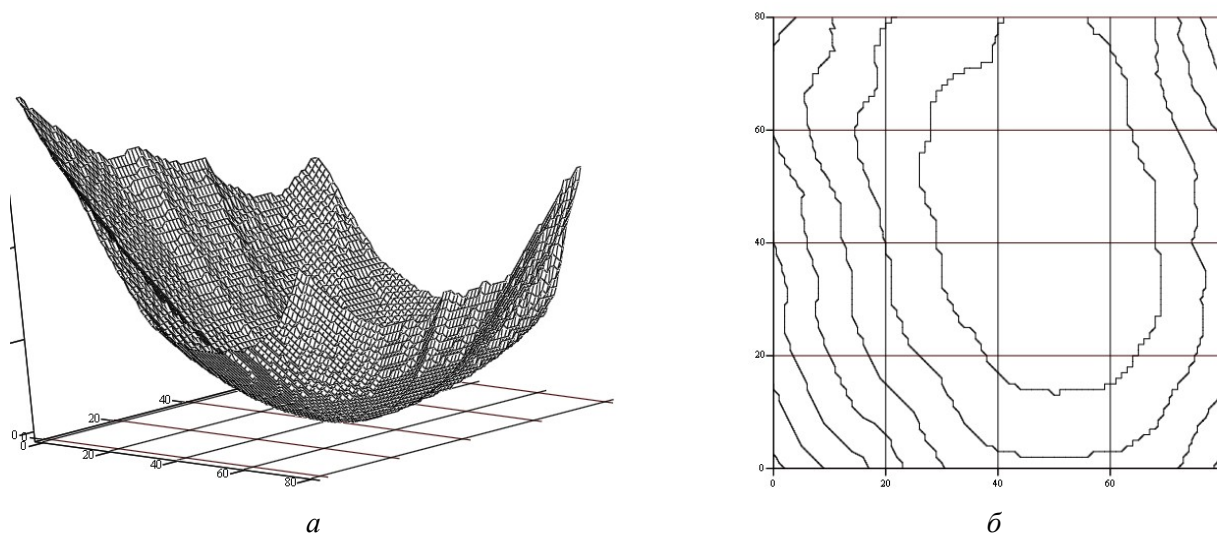


Рисунок 7 – Функція просторових координат  $K_{\text{sup}}(x, y)$  для випадку оптимальної орієнтації направленої антени приймача

З урахуванням співвідношень (14) і (15) зоною завадостійкого радіообміну максимального розміру для каналу радіозв'язку UHF/VHF діапазону з направленими антенами можна вважати область

$$\Omega_s = \left\{ \forall (x, y) \in \Omega \mid K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*, \varphi_2^*) \leq K_{\text{th}} \right\}. \quad (16)$$

Відповідно межі зони завадостійкого радіообміну (16) належать ізолінії рівня  $K_{\text{th}}$ , тобто геометричному місцю точок з координатами  $(x, y)$ , які розташовані на висоті  $K_{\text{th}}$  і мають у будь-якому своєму околі інші точки з відмінною висотою:

$$I_{K_{\text{th}}} = \left\{ \begin{array}{l} (x, y) \mid K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*, \varphi_2^*) = K_{\text{th}}; \\ \forall \varepsilon > 0 : \exists (x', y') : |(x', y'), (x, y)| < \varepsilon, K_{\text{sup}}(x', y', \theta_2^*, \varphi_2^*) \neq K_{\text{th}} \end{array} \right\}. \quad (17)$$

Для обчислення координат точок ізолінії необхідно розробити простий і ефективний чисельний метод, що відрізняється однозначністю і невеликою трудомісткістю.



### Алгоритм визначення зони завадостійкого радіообміну

Для розв'язування задачі (17) використовуємо той факт, що необхідно знайти тільки одну лінію рівня, а також те, що в площині  $xOy$  точка розташування передавача сигналу  $(x_1, y_1)$  завжди знаходиться в межах зони  $\Omega_s$ . Вихід з цієї стартової точки на межу зони завадостійкого радіообміну забезпечимо, використовуючи принцип хвильового алгоритму Лі [14].

Будемо розглядати піксельну матрицю зображення оперативної карти як дискретне робоче поле (ДРП). Кожен піксель зображення карти є осередком ДРП. Для завдання обчислення межі зони завадостійкості (17) пропонується така модифікація хвильового алгоритму.

Вхідними даними алгоритму є:

- координати передавача сигналу  $(x_1, y_1, z_1)$  і його потужність  $P_1$ ;
- координати приймача сигналу  $(x_2, y_2, z_2)$  і функція ДН його антени  $G_2(\theta, \varphi)$ ;
- параметри джерел радіоперешкод  $S_i(x_3, y_3, z_3, P_3)$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Робочі змінні і масиви алгоритму наведені у таблиці.

Таблиця 1 – Робочі змінні і масиви алгоритму побудови ізолінії

Ім'я	Тип	Призначення
N	integer	розмір зображення оперативної карти по осі X
M	integer	розмір зображення оперативної карти по осі Y
B	array[1..N, 1..M] of boolean	бітова маска оперативної карти
F	integer	довжина фронту хвилі
Front	array[1..Lf] of record x, y : integer end	координати точок фронту хвилі
Lfnew	integer	довжина нового фронту хвилі
Fnew	array[1..Lfnew] of record x, y : integer end	координати точок нового фронту хвилі
Stop	boolean	ознака закінчення процесу поширення хвилі
x, y	integer	координати поточної точки ДРП
DX	array [1..4] of integer = (0,1,0,-1)	модифікація координат точки ДРП по осі X
DY	array [1..4] of integer = (-1,0,1,0)	модифікація координат точки ДРП по осі Y
Pixels	integer	лічильник стану сусідніх точок ДРП

Вихідними даними алгоритму є кількість точок ізолінії  $L_i$  та масив координат точок ізолінії  $Izoline$ .

Робота алгоритму складається з трьох етапів:

- ініціалізація;
- поширення хвилі;
- формування масиву координат точок ізолінії на карті.

Етап ініціалізації полягає у визначенні властивостей осередків ДРП. Всі осередки ДРП вважаються вільними, всі елементи бітової маски отримують значення False. Визначається стартовий осередок (точка розташування передавача на карті), у відповідному полі бітової маски записується значення True, у масив фронту хвилі Front записується точка  $(x_1, y_1)$ .

Етап поширення хвилі. У процесі утворення нового фронту для кожної “точки-кандидата” з координатами  $(x, y)$  визначається оптимальна орієнтація (15) антени приймача за азимутом і кутом місця. Якщо умова належності точки зоні завадостійкого радіообміну (16) виконується, точка включається в новий фронт. Відповідний елемент бітової маски  $B(x, y)$  набуває значення True. Процес поширення хвилі закінчується на межі зони завадостійкого радіообміну  $\Omega_s$ , коли для будь-яких нових “точок-кандидатів” перестає виконуватися умова (16).

Етап формування масиву координат точок ізолінії на карті. Виконується сканування бітової маски B. Якщо для точки на карті з координатами  $(x, y)$  виконується умова  $B[x, y] = \text{True}$  і хоча б одна з сусідніх точок, що оточують, має стан False, формулюється висновок, що точка належить ізолінії (17), і її координати додаються в масив.

Наведемо алгоритм обчислення.

**Input:**  $(x_1, y_1, z_1)$ : integer; /\*Координати передавача сигналу\*/  
 $P_1$ : integer; /\*Потужність передавача сигналу \*/  
 $(x_2, y_2, z_2)$ : integer; /\* Координати приймача сигналу \*/  
 $S_i(x_3, y_3, z_3, P_{3_i}), i = 1..K$ : integer; /\*Параметри джерел радіоперешкод\*/  
**Output:**  
 $L_i$ : integer; /\*Кількість точок ізоляції\*/  
Izoline: array [1.. $L_i$ ] of record x, y: integer end; /\* Координати точок ізоляції\*/  
/\*ініціалізація\*/  
1.  $B \leftarrow \text{False}$ ;  
2.  $L_f \leftarrow 1$ ; Front.X[1]  $\leftarrow x_1$ ; Front.Y[1]  $\leftarrow y_1$ ;  
3.  $B[x_1, y_1] \leftarrow \text{True}$ ;  
/\*поширення хвилі\*/  
4. **repeat**  
5.  $L_{fnew} \leftarrow 0$ ;  
6. Stop  $\leftarrow \text{True}$ ;  
7. **foreach**  $i \in [1, L_f]$  **do**  
8. **foreach**  $j \in [1, 4]$  **do**  
9.  $x \leftarrow \text{Front.X}[i] + \text{DX}[j]$ ;  $y \leftarrow \text{Front.Y}[i] + \text{DY}[j]$ ;  
10. **if**  $B[x, y]$  **then** *continue*;  
11.  $\theta_2^*, \varphi_2^* \leftarrow \arg \min_{\theta_2 \in \Theta, \varphi_2 \in \Theta\Phi} K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2, \varphi_2)$  /\* (15) \*/  
12. **if**  $K_{\text{sup}}(x, y, \theta_2^*, \varphi_2^*) \leq K_{\text{th}}$  **then** /\* (16) \*/  
13.  $L_{fnew} \leftarrow L_{fnew} + 1$ ;  
14.  $\text{Fnew.X}[L_{fnew}] \leftarrow x$ ;  $\text{Fnew.Y}[L_{fnew}] \leftarrow y$ ;  
15.  $B[x, y] \leftarrow \text{True}$ ;  
16. Stop  $\leftarrow \text{False}$ ;  
17. **end if**  
18. **end for**  
19. **end for**  
20. Front  $\leftarrow$  Fnew;  $L_f \leftarrow L_{fnew}$ ;  
21. **until** Stop ;  
/\*ізоляція\*/  
22.  $L_i \leftarrow 0$   
23. **foreach**  $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$  **do**  
24. **foreach**  $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$  **do**  
25. Pixels  $\leftarrow 0$   
26. **foreach**  $j \in [1, 4]$  **do**  
27.  $x' \leftarrow x + \text{DX}[j]$ ;  $y' \leftarrow y + \text{DY}[j]$ ;  
28. **if**  $B[x', y']$  **then** Pixels  $\leftarrow$  Pixels + 1; ;  
29. **end for**  
30. **if** (Pixels > 0) and (Pixels < 4) **then**  
31.  $L_i \leftarrow L_i + 1$ ;  
32. Izoline.X[ $L_i$ ]  $\leftarrow x$ ; Izoline.Y[ $L_i$ ]  $\leftarrow y$ ;  
33. **end if**  
34. **end for**  
35. **end for**

Підрахувавши кількість осередків бітової маски В зі станом True і прив'язуючись до масштабу карти, додатково можна оцінити площу отриманої зони завадостійкого радіообміну  $\Omega_s$ . Трудомісткість запропонованого алгоритму зменшується, порівняно з алгоритмом Marching Squares, через те що обчислення коефіцієнтів придушення  $K_{sup}(x, y)$  виконуються не у всіх точках карти, а тільки в точках поширення хвилі. Етап формування масиву координат точок ізолінії на карті, на якому виконується сканування бітової маски карти, не вимагає складних обчислень, тому виконується швидко.

#### **Оцінка ефективності запропонованого підходу**

У розробленій програмі підтримки швидкої організації захищеного радіообміну розрахунки проводяться з прив'язуванням до карти місцевості. Розглянемо приклади розрахунків, що підтверджують ефективність запропонованого підходу.

На рис. 8 подані результати обчислення меж зони завадостійкого радіообміну з ненаправленою антенною системою приймача для випадків, що відповідають двом значенням коефіцієнта у співвідношенні (6):

- 1)  $\beta < 1$ , коли енергетичний потенціал джерела перешкод невеликий, зона завадостійкого прийому – це весь простір карти, крім зони подавлення (коло праворуч);
- 2)  $\beta > 1$ , коли енергетичний потенціал джерела перешкод перевищує потужність передавача сигналу, зона завадостійкого радіообміну (коло зліва).

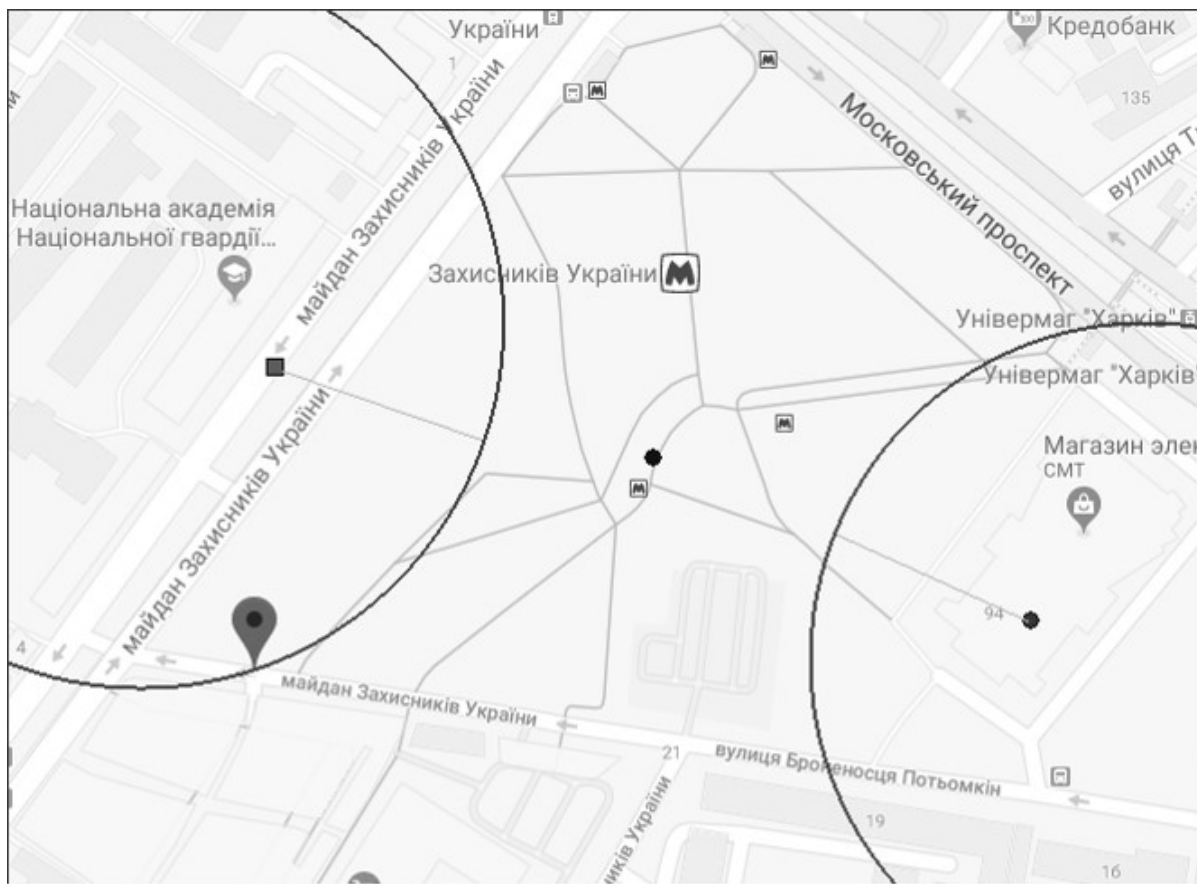


Рисунок 8 – Межі зон завадостійкого радіообміну для приймача з дипольною антеною

Порівнюючи форму зон завадостійкого радіообміну на рисунках 8 та 2, можна дійти висновку про несуперечність результатів обчислень і даних, отриманих у праці [10] аналітичним методом.

Вплив способу орієнтації направленої антени системи на форму і розмір зони завадостійкого радіообміну можна оцінити за результатами розрахунків для окремого випадку оперативної обстановки у міських умовах (рис. 9). Одиночне джерело завад розміщене на висоті третього поверху будинку.

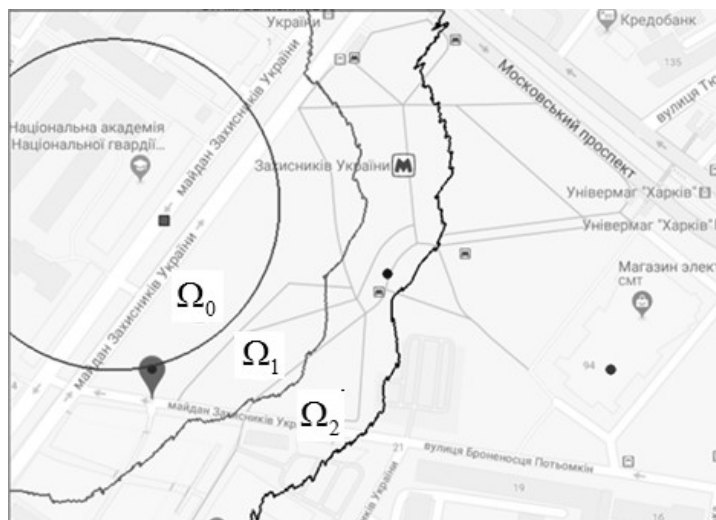


Рисунок 9 – Зони завадостійкого радіообміну для різних способів орієнтації направленої антени приймача

Зона завадостійкого радіообміну  $\Omega_0$  для випадку приймача з дипольною антеною розташована всередині області, що має форму кола. Межі зони  $\Omega_1$  отримані для випадку, коли приймач має направлену антенну систему з оптимальною орієнтацією за кутом азимута. Межі зони завадостійкого радіообміну  $\Omega_2$  отримані з використанням співвідношення (15), коли приймач має направлену антенну систему з оптимальною орієнтацією за кутом азимута і кутом місця. Відповідні значення коефіцієнта покриття області на карті (4) складають  $K_{cov0} = 0,18$ ;  $K_{cov1} = 0,34$ ;  $K_{cov2} = 0,5$ . Збільшення коефіцієнта покриття області на карті для максимальної зони завадостійкого радіообміну у 2,8 разу відносно  $\Omega_0$  і у 1,5 разу відносно  $\Omega_1$  забезпечується за рахунок оптимальної орієнтації направленої антенної системи приймача в кожній точці карти не тільки за кутом азимута, а й за кутом місця.

### Висновки

Запропоновано метод визначення меж максимальної за розміром зони стійкого радіоприйому в діапазоні UHF / VHF для мобільних засобів радіозв'язку.

У методі використано вдосконалену модель каналу радіозв'язку в умовах впливу системи джерел електромагнітних полів, розташованих на різних висотах. Для використання моделі необхідна наявність цифрової 3D-діаграми направленості антени приймача сигналу.

Сформульовано задачу визначення меж максимальної за розміром зони стійкого радіоприйому у вигляді пошуку одиночної ізолінії в скалярному полі. Для її вирішення запропонована модифікація хвильового алгоритму, у якій використано вдосконалену модель каналу радіозв'язку, і яка відрізняється однозначністю і невисокою трудомісткістю. Збільшення розмірів зони сталого радіоприйому досягається оптимальною орієнтацією антени приймача сигналу в кожній її точці.

Розроблено комп'ютерну програму підтримки швидкої організації захищеного радіообміну засобів радіозв'язку UHF / VHF діапазону.

Ефективність запропонованого методу підтверджується збільшенням площі зони завадостійкого радіообміну в 2,8 разу, порівнюючи з варіантом використання мобільного радіоприймача зі звичайною дипольною антеною. Для випадку оптимальної орієнтації направленої антенної системи приймача в кожній точці карти тільки за кутом азимута додаткова оптимізація за кутом місця дає вигаш у 1,5 разу.

Метод дозволяє отримати реальну зону завадостійкого радіообміну, форма якої залежить від характеристик і орієнтації антен засобів радіообміну та кількості, потужності і просторового розташування джерел радіоперешкод.

### Перелік джерел посилання

1. Jamming Solutions. URL: <https://cutt.ly/TtHmsq2> (дата звернення: 07.04.2020).
2. Федін О. В., Живчук В. Л., Лаврут О. О., Івко С. О. Проблеми забезпечення радіозв'язку в тактичній ланці управління під час проведення АТО. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ* : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 трав. 2015 р.). С. 172.
3. Кас'яненко М. В., Ясинецький В. П. Основні напрями підвищення розвідзахищеності радіоелектронних засобів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ* : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 14-15 трав. 2015 р.). С. 146.
4. EMC within Power Plants and Substations. Technical Brochure. Working Group C4.208, 2013. 309 p. URL: <https://cutt.ly/ltJy5Bz> (дата звернення: 01.10.2019).
5. EMC within Power Plants and Substations. URL: <https://e-cigre.org/publication/535-emc-within-power-plants-and-substations> (дата звернення: 04.11.2019).
6. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу : навч. посіб. / за ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Кривуци та Т. М. Наритника. Київ : ДУІКТ, 2012. 586 с.
7. ANSYS HFSS. 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design. URL: <https://cutt.ly/wdugp1J> (дата звернення: 01.08.2020).
8. Игнатов В. А. Теория информации и передачи сигналов : учеб. для ВУЗов. Москва : Сов. Радио, 1979. 280 с.
9. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Москва: Физматгиз, 1963. 276 с.
10. Куприянов А. И. Радиоэлектронная борьба. Москва : Вузовская книга, 2013. 360 с.
11. Малюк В. Г., Іохов О. Ю., Кузьминич І. В. Метод визначення меж зони стійкого радіообміну підрозділів внутрішніх військ в умовах радіопридушення. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків : ХУПС, 2014. № 1(37). С. 56–62.
12. Іохов О. Ю. Захист радіомереж підрозділів Національної гвардії України від радіотехнічної розвідки : монографія. Харків : НАНГУ, 2017. 214 с.
13. Marching Squares. URL: <https://cutt.ly/etHYEaq> (дата звернення: 07.04.2020).
14. Lee, C. Y. An Algorithm for Path Connections and Its Applications. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5219222> (дата звернення: 04.11.2020).
15. Mototrbo™ DP4800 / DP4801 digital portable two-way radio. URL: <https://cutt.ly/Qdud68x> (дата звернення: 01.08.2020).

*Стаття надійшла до редакції 15.01.2021 р.*

**УДК 623.55.02**

**А. Ю. Іохов, В. Г. Малюк, Є. О. Каплун**

### **АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ЗОНЫ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ РАДИОКАНАЛА СВЯЗИ UHF / VHF ДИАПАЗОНА В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКОВ РАДИОГЛУШЕНИЯ, НАХОДЯЩИХСЯ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ**

*Предложен метод определения границ максимальной по величине зоны устойчивого радиоприема в диапазоне UHF / VHF для мобильных средств радиосвязи в условиях действия системы радиопомех.*

*Сформулирована задача определения границ зоны устойчивого радиообмена средств мобильной радиосвязи, использующих направленные антенны в условиях реальных препятствий, в виде задачи поиска одиночной изолинии в скалярном поле. Для определения координат точек карты, принадлежащих изолинии, предлагается модификация волнового алгоритма, которая отличается невысокой трудоемкостью и однозначностью полученных результатов.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а : радиоэлектронная защита, помехозащищенность, волновой алгоритм, изолиния.*

UDC 623.55.02

**О. Іохов, В. Малюк, Є. Каплун**

**ALGORITHM FOR DETERMINING THE BOUNDARIES OF THE ZONE OF INTERFERENCE OPERATION OF THE RADIO CHANNEL OF THE UHF / VHF RANGE COMMUNICATION IN THE CONDITIONS OF OPERATION OF THE RADIOSHENOPRIAD SOURCE SYSTEM AT DIFFERENT HEIGHTS**

*A method for determining the limits of the maximum size of the stable radio reception area in the UHF / VHF range for mobile radio communication under the conditions of the radio interference system is proposed. The radio is intended to use a directional antenna or screen. Increasing the size of the stable radio reception area is provided by the optimal orientation at each point of the antenna device in azimuth and angle using the model of the radio channel, which allows to calculate the signal / interference ratio taking into account the spatial location of radio interference sources and digital 3D antenna pattern. receiver.*

*The problem of determining the boundaries of the zone of stable radio exchange of mobile radio means using directional antennas in the conditions of real interference is formulated in the form of the problem of finding a single isoline in a scalar field. To determine the coordinates of the points of the map belonging to the isoline, a modification of the wave algorithm is proposed, which is low complexity and unambiguous results.*

*Examples of practical use of the proposed numerical method allow us to conclude that the results are inconsistent with the data obtained in the known works by the analytical method for a particular case. At the same time, the numerical approach used significantly expands the possibilities of calculations by taking into account the location of multiple sources of radio interference at different altitudes, as well as the optimal orientation of the digital 3D - pattern of the antenna device of the signal receiver.*

*The effectiveness of the proposed method is confirmed by increasing the area of the noise-tolerant radio exchange zone by 2.8 times in relation to the option of using a mobile radio with a dipole antenna. For the case of optimal orientation of the directional antenna of the receiver by the azimuth angle, additional optimization by the angle of the place gives a gain of 1.5 times.*

*К е у в о р д с: electronic protection, noise immunity, wave algorithm, isoline.*

**Іохов Олександр Юрійович** – доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, начальник кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-1718-0138>

**Малюк Віктор Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри військового зв'язку та інформатизації Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0001-6510-3025>

**Каплун Євген Олександрович** – ад'юнкт Національної академії Національної гвардії України.

<https://orcid.org/0000-0002-1085-446X>