

УДК 623.55.02



В. Г. Малюк

КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ УМОВ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОКАНАЛУ VHF/UHF ДІАПАЗОНУ З УРАХУВАННЯМ ЗОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ДОСТУПНОСТІ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

На основі відомих математичних моделей поширення радіосигналу отримані математичні співвідношення для умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону з урахуванням зон електромагнітної доступності джерел радіовипромінювання. Розроблено програмний засіб для комп'ютерного аналізу умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону із прив'язуванням до топографічної мапи місцевості. Мається можливість розрахунку меж зони розміщення мобільної компоненти каналу радіозв'язку, знаходження у якій забезпечує завадостійкий радіообмін в умовах поточної оперативної обстановки. При цьому враховуються чутливість і потужність передавача, форма діаграм спрямованості антен радіозасобів, масштаб мапи, втрати потужності на трасі поширення сигналу.

К л ю ч о в і с л о в а: зона електромагнітної доступності, завадозахищеність радіоканалу.

Постановка проблеми. У сучасних умовах ведення бойових дій радіоелектронна боротьба стала одним із ключових інструментів противника для дезорганізації систем управління та зв'язку. Найпоширеніші канали радіозв'язку (КРЗ) VHF/UHF діапазону, що забезпечують передавання оперативної інформації, стають першочерговою мішенню для засобів придушення, перехоплення та аналізу сигналів. Забезпечення надійного завадозахищеного зв'язку безпосередньо впливає на ефективність управління, координацію дій, оперативність реагування й загальну стійкість системи управління Сил безпеки України під час кризових ситуацій.

Окремим викликом стає використання штучного інтелекту у сучасних засобах радіоелектронної боротьби. Інтелектуальні алгоритми дозволяють противнику в режимі реального часу аналізувати електромагнітний спектр, визначати структуру сигналів і підбирати оптимальні параметри придушення [1]. Це ставить під сумнів ефективність традиційних засобів протидії та робить актуальною задачу впровадження спеціалізованого програмного забезпечення у складі автоматизованих систем адаптивного захисту КРЗ, здатних діяти швидше за противника.

Метою статті є розроблення спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу на топографічній мапі умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону за наявності системи джерел навмисних завад із урахуванням зон електромагнітної доступності джерел радіовипромінювання.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомі програмні продукти компанії ATDI для планування РЕБ, як-от HTZ WARFARE [2], дозволяють вирішувати такі завдання:

- розрахунок покриття, інтерференцій та планування систем перехоплення радарів;
- планування перехоплення рухомих систем зв'язку;
- оптимізацію місця розташування станцій придушення;
- розрахунок мінімальної потужності систем придушення.

Недоліком використання таких комерційних програмних продуктів є висока вартість їхнього придбання, закритість програмного забезпечення, надлишковість функцій відносно поставленої тактичної задачі.

У праці [3] розглянуто математичну модель захисту каналу мобільного радіозв'язку від подавлення системою джерел навмисних завад (СДНЗ) без урахування зон електромагнітної доступності (ЕМД) джерел радіовипромінювання. Під зоною ЕМД радіопередавача або джерела навмисних завад (НЗ) розуміється сукупність точок простору, в яких даний передавач забезпечує на вході відповідного

приймача мінімально необхідну потужність радіосигналу, що залежить від чутливості приймача. Врахування дальності дії джерела радіовипромінювання UHF/VHF діапазону є важливим питанням у завданнях організації роботи КРЗ VHF/UHF діапазону, особливо при виконанні службово-бойових завдань підрозділами тактичної ланки, коли відстань між джерелами радіовипромінювання сягає 5..10 км.

У статті [4] запропоновано метод розрахунку меж зони ЕМД радіозасобів КРЗ, заснований на модифікованому хвильовому алгоритмі. При цьому враховуються чутливість приймача, потужність передавача і форма цифрової діаграми спрямованості (ДС) його антени, масштаб карти і втрати потужності сигналу залежно від характеристик місцевості. Метод характеризується простотою, високою швидкістю і надійністю обчислень.

У праці [6] отримані математичні співвідношення для умов працездатності радіоканалу VHF/UHF діапазону з урахуванням зон ЕМД джерел радіовипромінювання. Розроблена методика комп'ютерного аналізу умов працездатності радіоканалу VHF/UHF діапазону реалізована у програмі оперативного забезпечення роботи мобільних засобів радіозв'язку, яка використовується у тактичних ланках управління частинами та підрозділами правоохоронних органів України.

Результати досліджень, наведених вище, є основою для розроблення математичної моделі та програмного забезпечення для аналізу умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону з урахуванням зон електромагнітної доступності джерел радіовипромінювання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо модифікацію моделі КРЗ, викладену у статті [3], з такими об'єктами (рис. 1).

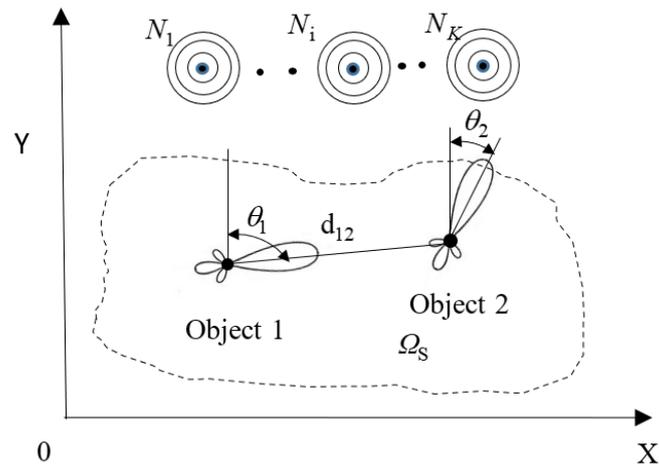


Рисунок 1 – Об'єкти каналу мобільного радіозв'язку

Об'єкт 1. Пункт управління (ПУ) у точці з координатами (x_1, y_1) . Має приймач / передавач потужністю P_1 з нормованою ДС антени $G_1(\theta)$, власний азимут ДС антени становить кут θ_1 .

Об'єкт 2. Мобільна група підрозділу НГУ (ПНГ) у точці з координатами (x_2, y_2) . Має приймач / передавач потужністю P_2 з нормованою ДС антени $G_2(\theta)$, власний азимут ДС антени становить кут θ_2 .

Чутливість приймачів обох об'єктів 1 та 2 вважатимемо однаковою та рівною E_{s12} мкВ.

Об'єкт 3. СДНЗ у вигляді множини джерел НЗ $\{N_1, N_2, \dots, N_K\}$, кожне з яких має потужність P_{3i} і розташоване у точці з координатами (x_{3i}, y_{3i}) , $i = 1 \dots K$. Вважається, що випромінювання джерел НЗ має неспрямований характер, тому ДС їхніх антен описується функцією $G_3(\theta) = 1$.

Позначимо область топографічної мапи з тактичною обстановкою як Ω .

Визначимо умову необхідності захисту КРЗ від СДНЗ, яка полягає у тому, що об'єкти 1 та 2 радіоканалу повинні бути доступними для подавлення джерелами НЗ, тобто знаходитися в області ЕМД об'єкта 3.

Загальну потужність НЗ на вході радіоприймача об'єкта 1 можна розрахувати за формулою [3]

$$P_{N_1} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^K \frac{P_{3i} G_1(\theta_{13i} - \theta_1) \lambda^2}{(4\pi d_{13i})^2} \right], \quad (1)$$

де P_{3_i} – потужність i -го джерела НЗ;

d_{13_i} – відстань від антени приймача об'єкта 1 до i -го джерела НЗ;

θ_{13_i} – азимут антени приймача об'єкта 1 до i -го джерела НЗ.

Умову недоступності радіоприймача об'єкта 1 для подавлення системою джерел НЗ супротивника можна записати як

$$C_{free1} = P_{N_1} \leq P_{min12}, \quad (2)$$

де P_{min12} визначає мінімально необхідну для якісного прийому потужність корисного сигналу на вході приймача КРЗ.

Аналогічно для радіоприймача об'єкта 2 умова недоступності для подавлення СДНЗ супротивника має такий вигляд:

$$C_{free2} = P_{N_2} \leq P_{min12}, \quad (3)$$

де загальна потужність НЗ на вході радіоприймача об'єкта 2 відповідно

$$P_{N_2} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^K \frac{P_{3_i} G_2(\theta_{23_i} - \theta_2) \lambda^2}{(4\pi d_{23_i})^2} \right]. \quad (4)$$

Виконання умов (2) та (3) недоступності КРЗ для подавлення СДНЗ супротивника забезпечується завдяки відповідному розміщенню об'єктів 1 і 2 та правильній орієнтації ДС їхніх антен, тобто вибором власних кутів азимута θ_1 , θ_2 . Якщо умови C_{free1} та C_{free2} виконати неможливо, то необхідно обчислити такі власні кути азимута θ_1 та θ_2 , що забезпечують виконання щонайменше умов достатності захисту радіозасобів від подавлення системою джерел НЗ, які розглядаються нижче.

Для визначення умов достатності захисту КРЗ від впливу НЗ обчислимо потужність корисного сигналу об'єкта 1 на вході приймача об'єкта 2

$$P_{12} = P_1 + 10 \log[G_1(\theta_{12} - \theta_1)] + 10 \log[G_2(\theta_{21} - \theta_2)] - L_{P12}, \quad (5)$$

та потужність корисного сигналу об'єкта 2 на вході приймача об'єкта 1

$$P_{21} = P_2 + 10 \log[G_1(\theta_{12} - \theta_1)] + 10 \log[G_2(\theta_{21} - \theta_2)] - L_{P21}, \quad (6)$$

де θ_{12} – кут азимута від об'єкта 1 на об'єкт 2;

θ_{21} – кут азимута від об'єкта 2 на об'єкт 1;

L_{P12} , L_{P21} – втрати потужності корисного радіосигналу на трасі поширення від об'єкта 1 до об'єкта 2 і у зворотному напрямку;

Використовуючи енергетичний підхід, що ґрунтується на оцінюванні потужності корисного радіосигналу та сигналу радіоперешкоди, за відомого граничного відношення сигнал / перешкода (P_{min12}) на вході радіоприймача умову достатності захисту від подавлення джерелом НЗ у логарифмічному масштабі можна визначити як

$$K = P_N - P_S \leq K_{th}, \text{ dBm}, \quad (7)$$

де K – коефіцієнт придушення потужності корисного сигналу радіоперешкодою на вході радіоприймача;

P_N – потужність радіоперешкоди;

P_S – потужність корисного радіосигналу;

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

Нехай граничне значення коефіцієнта придушення для радіоприймача КРЗ дорівнює K_{th12} . Для захисту об'єкта 1 від подавлення СДНЗ коефіцієнт K_{21} придушення потужності корисного сигналу об'єкта 2 на вході приймача об'єкта 1 повинен бути менше K_{th12} :

$$K_{21} = P_{N_1} - P_{21} < K_{th12}. \quad (8)$$

Аналогічним чином для об'єкта 2 умова достатності захисту від подавлення СДНЗ має такий вигляд:

$$K_{12} = P_{N_2} - P_{12} < K_{th12}. \quad (9)$$

Виконання умов (8) і (9) забезпечується правильною орієнтацією ДС антен об'єктів 1 та 2, тобто вибором власних кутів азимута θ_1 та θ_2 .

Відповідно до визначень, наведених у працях [4, 5], зона розміщення Ω_s мобільної компоненти КРЗ (рис. 1), знаходження у якій забезпечує завадостійкий радіообмін в умовах оперативної обстановки, – це частина області топографічної мапи з тактичною обстановкою Ω , де виконуються умови недоступності радіозасобів каналу мобільного радіозв'язку для подавлення системою джерел НЗ (2) та (3) або умови достатності захисту радіозасобів від подавлення (8), (9):

$$\Omega_s = \left\{ \forall (x, y) \in \Omega \mid \begin{array}{l} C_{free1} \cup (K_{21} < K_{th12}) \\ C_{free2} \cup (K_{12} < K_{th12}) \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Простір, в межах якого коефіцієнт придушення потужності корисного сигналу перевищує значення K_{th12} , визначається як зона придушення радіозасобу КРЗ.

Розглянута методика оцінювання завадозахищеності реалізована у комп'ютерній програмі, яка дозволяє розрахувати на мапі зони ЕМД радіозасобів КРЗ VHF/UHF діапазону в умовах поточної оперативної обстановки, сформулювати висновок про завадозахищеність КРЗ та розрахувати межі зони Ω_s завадостійкого радіообміну ПУ з ПНГ. Центральним елементом інтерфейсу програми є мапа, де вказуються розташування радіозасобів ПУ (об'єкт 1), ПНГ (об'єкт 2), екземплярів множини об'єкта 3, виводяться результати розрахунків зон ЕМД радіозасобів (рис. 2).

На рис. 3 показаний варіант забезпечення захищеної роботи радіоканалу за наявності двох джерел НЗ. Результати розрахунків отримані на карті місцевості для потужності радіопередавачів 1 Вт та чутливості радіоприймачів $E_{s_{12}} = 0,25$ мкВ. Допустиме значення коефіцієнта придушення для радіоприймача каналу мобільного радіозв'язку $K_{th12} = -5$ дБ.

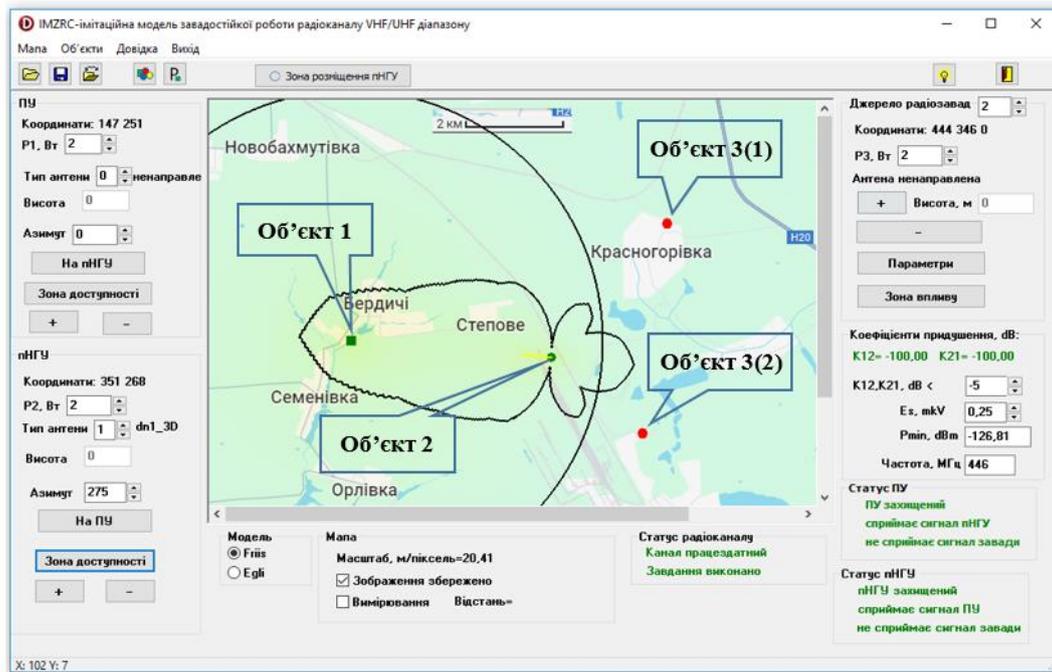


Рисунок 2 – Інтерфейс програми розрахунку заводостійкої роботи КРЗ

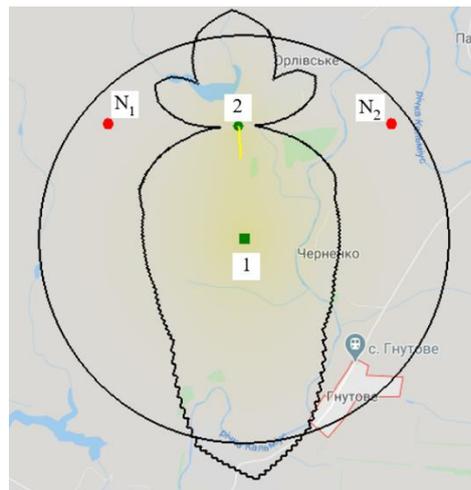


Рисунок 3 – Захищена робота радіоканалу

Задача перешкодостійкої роботи розв'язана шляхом вибору оптимального кута азимута об'єкта 2 (ПНГ), направлена ДС якого забезпечує дуже низький рівень радіоперешкод на вході її приймача. Коефіцієнт придушення корисного сигналу від об'єкта 1 (ПУ) має дуже низьке значення: $K_{12} = -100$ дБ. Це суттєво менше, ніж допустиме значення коефіцієнта придушення для радіоприймача КРЗ $K_{th12} = -5$ дБ, тому ПНГ працює практично не помічаючи радіоперешкод.

Ненаправлена ДС антени приймача об'єкта 1 (ПУ) забезпечує задовільний рівень коефіцієнта придушення корисного сигналу від ПНГ: $K_{12} = -7.81$ дБ. Це також менше, ніж допустиме значення $K_{th12} = -5$ дБ, тому загальним результатом є заводозахисна робота КРЗ за наявності двох джерел НЗ.

Результати розрахунків меж зони Ω_s відповідно до співвідношення (10), що обговорюються у наступних прикладах, отримані на карті місцевості для потужності радіопередавачів 2 Вт на частоті 446 Гц, чутливості радіоприймачів $E_{s12} = 0,25$ мкВ. Допустиме значення коефіцієнта придушення для радіоприймача КРЗ $K_{th12} = -5$ дБ.

Залежно від варіантів сполучення ДС радіозасобів КРЗ можуть бути одержані такі результати.

Варіант 1. Об'єкти 1 і 2 мають ненаправлену ДС. Об'єкт 1 (ПУ) не знаходиться під впливом НЗ, умова C_{free1} виконується (рис. 4, а).

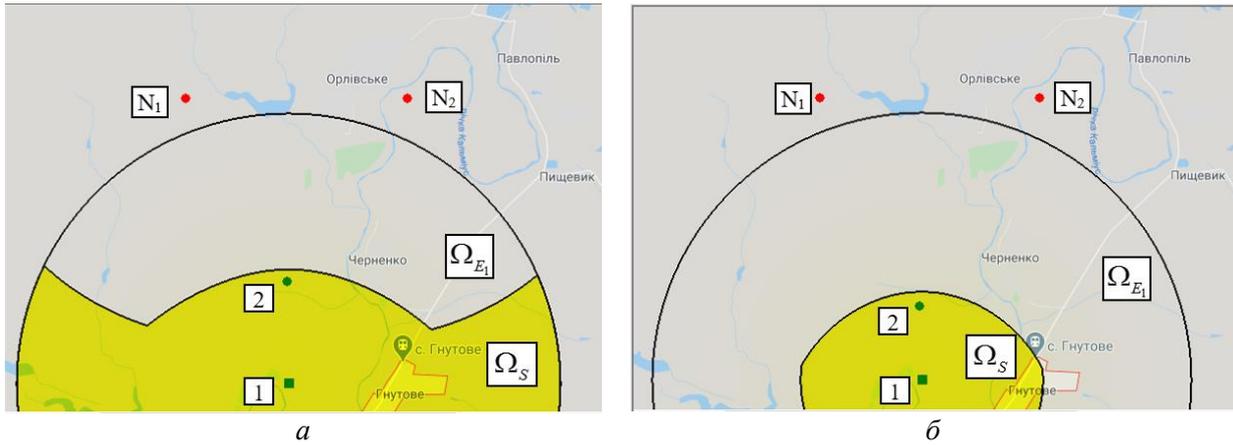


Рисунок 4 – Зони розміщення мобільної компоненти КРЗ для ненаправлених ДС радіозасобів КРЗ

Зона Ω_{E_1} ЕМД передавача ПУ (об'єкт 1) має форму кола з радіусом 5,2 км, її площа складає 34 % від загальної площі мапи. Обчислена зона Ω_S має жовтий колір, її межі частково співпадають з межами зони Ω_{E_1} , площа складає 23 % від загальної площі мапи.

Варіант 2. Об'єкти 1 і 2 мають ненаправлену ДС. Потужність СДНЗ збільшена, об'єкт 1 (ПУ) знаходиться під впливом НЗ, умова C_{free1} не виконується (рис. 4, б). Зона Ω_S має неправильну форму, її площа складає 6 % від загальної площі мапи.

Варіант 3. Об'єкт 1 (ПУ) має ненаправлену ДС, об'єкт 2 (ПНГ) має направлену ДС. ПУ не знаходиться під впливом НЗ, умова C_{free1} виконується (рис. 5, а).

Межі зони Ω_S практично співпадають з межами зони ЕМД передавача ПУ, за винятком деформації у фрагментах А та В, утворених під впливом джерел НЗ N_1 та N_2 відповідно.

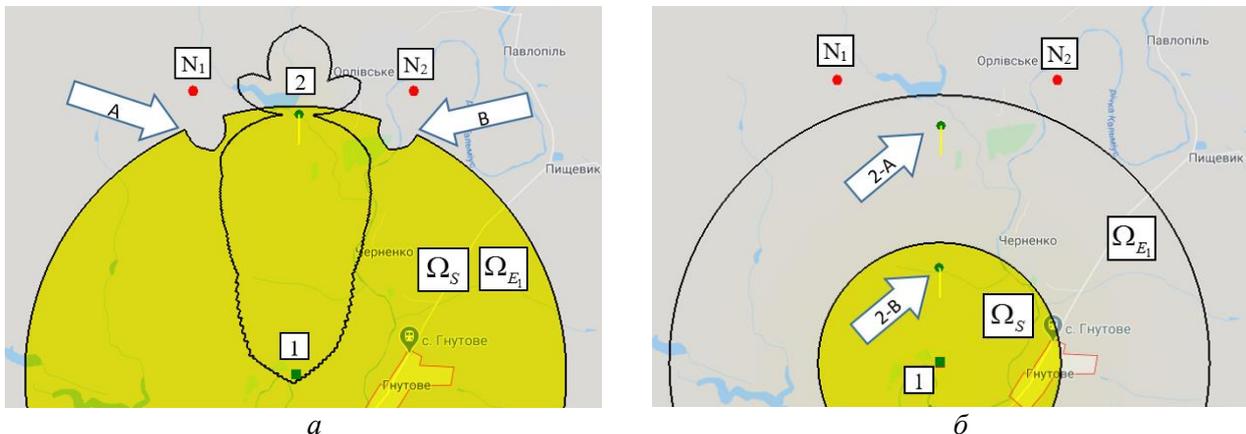


Рисунок 5 – Зони розміщення мобільної компоненти КРЗ для направленої ДС радіозасобу ПНГ

У наведеному на рис. 5, а варіанті розміщення об'єкта 2 (ПНГ) задача завадостійкої роботи розв'язана за рахунок вибору оптимального кута азимута направленої ДС радіозасобу об'єкта 2. Коефіцієнт придушення корисного сигналу від ПУ (об'єкт 1) має дуже низьке значення: $K_{12} = -100$ дБ. Це суттєво менше, ніж допустиме значення коефіцієнта придушення для радіоприймача каналу мобільного радіозв'язку $K_{th12} = -5$ дБ, тому об'єкт 2 працює практично не помічаючи радіоперешкод. Завдяки віддаленості ПУ (об'єкт 1) від ДСНЗ $K_{21} = -100$ дБ, тому об'єкт 1 працює також практично не помічаючи радіоперешкод. Завадостійку роботу КРЗ забезпечено.

Варіант 4. Об'єкт 1 (ПУ) має ненаправлену ДС, об'єкт 2 (ПНГ) має направлену ДС. ПУ знаходиться під впливом НЗ, умова C_{free1} не виконується (рис. 5, б).

Зона Ω_{E_1} ЕМД, як і у варіанті 1, має форму кола з радіусом 5,2 км, але зона Ω_S має менший радіус 2,3 км, її площа складає 8 % від загальної площі мапи, що суттєво менше, ніж у варіанті 2.1.

На рис. 5, б показані також дві можливі ситуації, в яких може опинитися КРЗ залежно від варіантів розташування об'єкта 2 з антеною, спрямованою на об'єкт Ситуація 1. У випадку розміщення об'єкта 2 у точці, позначеній як 2-А, приймач об'єкта 2 знаходиться у зоні Ω_{E_1} ЕМД передавача ПУ і приймає корисний радіосигнал об'єкта 1 з дуже низьким рівнем радіоперешкод, $K_{12} = -100$ дБ, умова (9) виконується. У той же час для приймача ПУ $K_{21} = 0,64$ дБ, умова (8) не виконується, корисний сигнал радіопередавача об'єкта 2 пригнічений. отже, у цьому варіанті КРЗ є працездатним, проте, радіообмін частково пригнічений. Ситуація 2. У разі розміщення об'єкта 2 у точці, позначеній як 2-В, $K_{12} = -100$ дБ, $K_{21} = -6,68$ дБ, умови (8) та (9) виконуються, що повністю забезпечує завадостійку роботу КРЗ за наявності двох джерел НЗ.

Висновки

На основі відомих математичних моделей поширення радіосигналу отримані математичні співвідношення для умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону з урахуванням зон електромагнітної доступності джерел радіовипромінювання.

Розроблена методика комп'ютерного аналізу умов завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону реалізована у програмі оперативного забезпечення роботи мобільних засобів радіозв'язку, що використовуються у тактичних ланках управління частинами та підрозділами правоохоронних органів України. На практичних прикладах показана доцільність розрахунку ЕМД радіозасобів за картою місцевості з тактичною обстановкою в задачах оцінювання завадозахищеності мобільного каналу радіозв'язку.

Одержані практичні результати можуть бути використані у роботі органів управління Сил безпеки України під час кризових ситуацій для забезпечення завадостійкого передавання оперативної інформації при підготовці та проведенні операцій військ (сил), у науково-дослідних роботах при проектуванні нових систем захисту радіомереж, у навчальному процесі для підготовки офіцерів з управління підрозділами радіозв'язку.

Можливі напрями продовження досліджень у рамках запропонованої концепції оцінювання завадозахищеності радіоканалу VHF/UHF діапазону полягають у врахуванні факторів, віднесених до особливостей поширення радіосигналу на місцевості, та тих, що впливають на форму і розміри зони ЕМД джерел радіовипромінювання: атмосферні умови, рельєф місцевості, відбивання і заломлення хвиль тощо.

Перелік джерел посилання

1. Air University. Implementing Machine Learning and AI for Automatic ELINT Identification. Maxwell AFB, 2025. 34 p.
2. HTZ warfare. URL:<http://www.atdi.com/htz-warfare> (дата звернення: 9.10.2025).
3. Development of a Method for Boundary Determination of the Noise-resistant Area of the UHF/VHF Band / O. Iohov et al. *Advances in Military Technology*. 2020. Vol. 15. No. 2. Pp. 231 – 246.
4. Bounds Calculation Method Of Electromagnetic Availability Zone Of Radio Emission Source / V. Maliuk et al. *Advances in Military Technology*. 2022. Vol. 17. No. 2. Pp. 341–356.
5. Іохов О. Ю., Малиук В. Г., Каплун Є. О. Алгоритм визначення меж зони завадостійкої роботи радіоканалу зв'язку UHF/VHF діапазону в умовах роботи системи джерел радіопридушення, розташованих на різних висотах. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2021. Вип. 1 (37). С. 38–51.
6. Малиук В. Г., Тимченко С. Ю. Комп'ютерний аналіз умов працездатності радіоканалу VHF/UHF діапазону з урахуванням зон електромагнітної доступності джерел радіовипромінювання. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. Харків, 2023. Вип.1 (41). С. 82–91.

Стаття надійшла до редакції 24.10.2025 р.

UDC 623.55.02

V. Maliuk

COMPUTER ANALYSIS OF INTERFERENCE IMMUNITY CONDITIONS OF THE VHF/UHF RADIO CHANNEL RANGE TAKING INTO ACCOUNT THE ZONES OF ELECTROMAGNETIC ACCESSIBILITY OF RADIO RADIATION SOURCES

The paper develops existing mathematical models for assessing the radio channel's operational conditions, taking into account the zones of electromagnetic availability of radio radiation sources, which is a key factor in organizing stable radio communication at a tactical depth of up to 5–10 km. A methodology for determining the conditions of unavailability of radio means for suppression and the conditions of sufficiency of their protection is proposed, which is based on an energy approach and takes into account the power of radio transmitters, the sensitivity of receivers, the characteristics of antenna directional patterns and the loss of radio wave propagation.

Based on the specified methodology, a computer program for operational support of interference-proof operation of the mobile radio communication channel of the security forces of Ukraine has been implemented. The software tool allows you to determine the zones of electromagnetic availability, analyze the impact of the system of sources of intentional interference on the radio channel, and calculate the boundaries of interference-proof radio communication between the control point and the mobile group on a topographic map. Examples of scenarios are given that demonstrate the change in interference immunity depending on the type of antenna beam patterns and the spatial mutual arrangement of objects.

The results obtained confirm that the correct choice of azimuth angles and the type of antenna beam pattern allows to significantly increase the security of the radio channel even in the presence of several sources of intentional interference.

The obtained practical results can be used in the work of the control bodies of the security forces of Ukraine during crisis situations to ensure interference-resistant and intelligence-protected transmission of operational information during the preparation and conduct of operations of troops (forces), in scientific research works when designing new systems for protecting radio networks, in the educational process when training officers in the management of radio communication units.

Key words: electromagnetic availability zone, interference protection of the radio channel.

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

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