

ШОВКОШИТНИЙ Ігор Іванович,

кандидат військових наук, старший науковий співробітник,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

МАРЧЕНКО Андрій Олександрович,

кандидат технічних наук,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0002-1268-8012>

МІНЕНКО Людмила Миколаївна,

доктор філософії,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0003-0249-9856>

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЗАВАД НА МЕЖІ ЗОНИ РАДІОВИДИМОСТІ

Під час поширення електромагнітних хвиль у реальних умовах спостерігається ефект їх затухання, що пов'язаний з поглинанням або розсіюванням хвиль у тропосфері, а також дифракційними втратами енергії. Це значно впливає на енергетичні параметри радіосигналів, визначення яких вважається особливо складним на межі зони радіовидимості.

***Метою статті є** розроблення методу визначення енергетичних параметрів радіозавад (радіосигналів) на межі зони радіовидимості з використанням методу лінійної інтерполяції для забезпечення оперативних розрахунків з оцінювання електромагнітної обстановки.*

***Методи дослідження.** Під час написання статті застосовано методи системного аналізу процесів поширення електромагнітних хвиль та синтезу методу визначення енергетичних параметрів радіосигналів. Зазначений методологічний підхід дав змогу отримати вираз для визначення множника ослаблення електромагнітного поля, який враховує поширення електромагнітних хвиль у приземних шарах тропосфери з відповідними втратами, зокрема, завдяки різній поляризації сигналів і приймальних антен.*

***Отримані результати дослідження.** Запропоновано використовувати метод лінійної інтерполяції для визначення енергетичних параметрів радіосигналів на межі зони радіовидимості, на які впливає діапазон дальностей, що залежать від дальності прямої видимості. Встановлено, що енергетичні параметри радіозавад можуть оцінюватися через напруженість електромагнітного поля в заданій точці простору або густину потоку потужності (вектор Умова-Пойнтинга) радіосигналів у місці розташування приймальної антени. Отримано вираз для апроксимованого значення множника ослаблення електромагнітного поля на довільній дальності в межах «зони напівтіні» та розроблено порядок визначення енергетичних параметрів радіосигналів на межі зони радіовидимості.*

***Елементом наукової новизни є** те, що запропонований метод доцільно застосовувати для вирішення прикладних завдань побудови ліній радіозв'язку, а також для прогнозування можливої завадової обстановки в районі бойових дій.*

***Теоретична та практична значущість статті.** Використання методу може забезпечити підвищення оперативності визначення енергетичних параметрів радіозавад на межі зони радіовидимості завдяки зменшенню кількості обчислювальних процедур. Такий підхід може бути доцільним під час прогнозування можливої завадової обстановки в районі бойових дій.*

***Ключові слова:** радіосигнал, радіозавади, енергетичні параметри, поширення електромагнітних хвиль, електромагнітне поле, зона радіовидимості, дальність прямої видимості, множник ослаблення.*

Вступ

Під час проведення оперативно-тактичних та інженерних розрахунків ліній зв'язку часто виникає потреба оцінювання реальної дальності дії засобів радіозв'язку та постановки радіозавад у конкретних умовах. Зокрема, для прогнозування можливої

електромагнітної обстановки й оцінювання меж ефективної дії засобів радіозв'язку та постановки радіозавад, нині прийнято створювати описові моделі, що базуються на визначенні типових просторово-енергетичних показників.

Постановка проблеми. Використання значень

дальності зв'язку й радіоподавлення, зазначених у тактико-технічних характеристиках засобів радіозв'язку та постановки завад, не завжди буває виправданим, оскільки висновок про можливість придушення радіотехнічного засобу (радіоприймача) противника можна зробити лише за умов визначення та порівняння енергетичних показників радіосигналів і радіозавад у конкретних точках простору (точках прийому), що перебувають у радіолініях «передавач радіозавад – засіб радіозв'язку» та «радіопередавач – радіоприймач противника» відповідно. Водночас потрібно комплексно враховувати низку чинників, зокрема:

взаємне розташування елементів таких ліній передачі;

характеристики спрямованості антенних систем засобів радіозв'язку та постановки радіозавад;

умови поширення електромагнітних хвиль (далі – ЕМХ).

Дальність дії засобів постановки радіозавад, як і засобів радіозв'язку, може перевищувати дальність прямої видимості, зокрема, внаслідок ефекту дифракційного поширення ЕМХ. Водночас, відомим є ефект ослаблення (затухання) ЕМХ під час їх поширення в реальних умовах, що пов'язано з поглинанням або розсіюванням їх у тропосфері, а також дифракційними втратами енергії [1]. Взаємна дія цих чинників значно впливає на енергетичні параметри радіосигналів, визначення яких вважається особливо складним на межі зони радіовидимості, де характер їх впливу різко змінюється. Отже, розвиток методичного апарату з визначення енергетичних параметрів радіозавад (радіосигналів) на межі зони радіовидимості (в «зоні напівтіні») є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням визначення енергетичних параметрів радіосигналів присвячена низка досліджень і публікацій. Так, у [2] наведено енергетичні співвідношення та порядок розрахунку ліній на основі цифрових радіорелейних і тропосферних ліній зв'язку. Показано, що на замирання сигналів впливають діаграми спрямованості антен, які обумовлені варіаціями кутів виходу і приходу ЕМХ, викликаними випадковими змінами рефракції.

Очікувана гранична дальність зв'язку для цифрових радіо- і радіорелейних засобів при різних швидкостях передачі інформації визначається у [3] за умов, того, що втрати потужності завдяки рельєфу прийнято рівними нулю.

Зокрема, у [4; 5] наведені класичні методи геометричної оптики та положення теорії електродинаміки та поширення ЕМХ, які можуть використовуватись під час розрахунку радіоліній.

Енергетичні показники радіосигналів у ближній зоні запропоновано визначати за інтерференційними виразами Б. А. Введенського, а в дальній зоні, за межами дальності прямої видимості (або в «зоні

радіотіні»), – за допомогою одночленної дифракційної формули В. А. Фока, що передбачає використання табличних даних і номограм. Складним є визначення енергетичних параметрів радіосигналів саме в «зоні напівтіні» [4; 5] внаслідок їх суттєвої залежності від кривизни земної поверхні та посилення впливу дифракційного ефекту. Використання для розрахунків у цій зоні виразів геометричної оптики призводить до значних похибок, а використання багаточленної дифракційної формули В. А. Фока [4] потребує трудомістких розрахунків унаслідок необхідності визначення суми ряду з необмеженою кількістю членів, використання табличних даних, номограм, а також показників, що характеризують напівпровідникові властивості земної поверхні.

Значні труднощі виникають під час реалізації підходу, що наведений у [4] і базується на методі інтерполяції функції множника ослаблення електромагнітного поля (далі – ЕМП) з використанням низки значень цього показника в ближній і дальній зонах, отриманих, за виразом Б. А. Введенського та одночленною формулою В. А. Фока відповідно.

Наведені підходи не дають змогу швидко отримати результати розрахунків і є доволі громіздкими, що обмежує можливість їх використання під час вирішення практичних задач. Відомими є часткові методики та статистичні моделі, зокрема, Окамура-Хата, COST 231-Хата, Уолфіша, ITU-R Recommendation M.1318-1 [6] та інші, отримані на основі аналітичної апроксимації результатів практичних вимірювань, що використовуються для визначення меж зони гарантованого приймання або оцінювання безперервних радіозавад. Однак, вони розроблені для певного типу місцевості та справедливі лише в межах прямої радіовидимості (до 20 км) і окремих ділянок радіодіапазону (1,5-2 ГГц).

Аналітичні вирази для визначення дальності дії радіозавад у вільному просторі наводяться у [7; 8], але вони не враховують ефект затухання ЕМХ під час їх поширення в тропосфері.

У [9; 10] для визначення енергетичних параметрів ЕМП на межі зони радіовидимості також запропоновано використовувати методи інтерполяції. Але аналітичні вирази для розв'язання цього завдання у зазначених джерелах не наводяться.

В обчислювальній математиці інтерполяція застосовується як спосіб визначення проміжних значень величин за дискретним набором відомих даних, для чого використовуються декілька методів, наведених у [9]. Наголошується, що використання спрощених інтерполяційних функцій не дає змоги одержати так само точні результати, які б визначала первісна функція.

Однак, під час оперативних розрахунків з оцінювання електромагнітної обстановки при підготовці до бойових дій, використання традиційних підходів потребуватиме значних витрат часу. Водночас точність результатів залишатиметься

низькою, адже похибки будуть зумовлені скоріше не розрахунковими процедурами, а невизначеністю (не повним обсягом) вихідних даних стосовно розміщення засобів постановки радіозавад або засобів радіозв'язку противника та характеру місцевості.

У таких умовах буде виправданим використання методу на основі лінійної інтерполяції, точність якої буде сумірною з точністю вхідних даних, але забезпечить підвищення оперативності розрахунків енергетичних параметрів радіозавад (радіосигналів) на межі зони радіовидимості (в «зоні напівтіні»).

Метою статті є розроблення методу визначення енергетичних параметрів радіозавад (радіосигналів) на межі зони радіовидимості з використанням методу лінійної інтерполяції для забезпечення оперативних розрахунків з оцінювання електромагнітної обстановки.

Виклад основного матеріалу дослідження

На енергетичні параметри ЕМП радіосигналів (радіозавад) на межі зони радіовидимості (в «зоні напівтіні») впливає діапазон дальностей, що прямо залежать від дальності прямої видимості $(0,8-1,2) \cdot R_{\text{пв}}$ [4; 5]. Унаслідок того, що радіозавади є різновидом радіосигналів, їхні енергетичні параметри можуть оцінюватись через показники, що використовуються в теорії поширення радіохвиль [11], зокрема, через напруженість ЕМП радіосигналів (радіозавад) у заданій точці простору:

$$E = \frac{\sqrt{30P_1 \cdot G_1}}{r} \cdot F \text{ В/м}, \quad (1)$$

де G_1 – коефіцієнт підсилення передавальної антени засобу радіозв'язку (постановки радіозавад);

r – відстань від передавача до точки вимірювання енергетичних параметрів;

P_1 – потужність передавача;

F – множник ослаблення ЕМП, що враховує поширення ЕМХ у приземних шарах тропосфери з відповідними втратами, зокрема, завдяки різній поляризації сигналів та приймальних антен [12].

Або через густину потоку потужності (вектор Умова-Пойнтинга) [13] радіосигналів (радіозавад) у заданій точці простору (місці розташування приймальної антени):

$$\Pi = \frac{P_1 \cdot G_1}{4\pi \cdot r^2} \cdot F^2 \text{ Вт/м}^2. \quad (2)$$

Значення множників F для лінії «передавач радіозавад – засіб радіозв'язку» та для лінії «радіопередавач – радіоприймач противника» будуть різними навіть в однакових умовах поширення ЕМХ [8] і залежатимуть від багатьох чинників, зокрема, від висоти підняття антен, довжини хвилі, властивостей середовища поширення та характеру земної поверхні [4; 11]. За певних умов, особливо на значних відстанях від передавача радіосигналів (радіозавад), $F \ll 1$. Характер змін множника F та основні підходи до його визначення наведено на рис. 1.

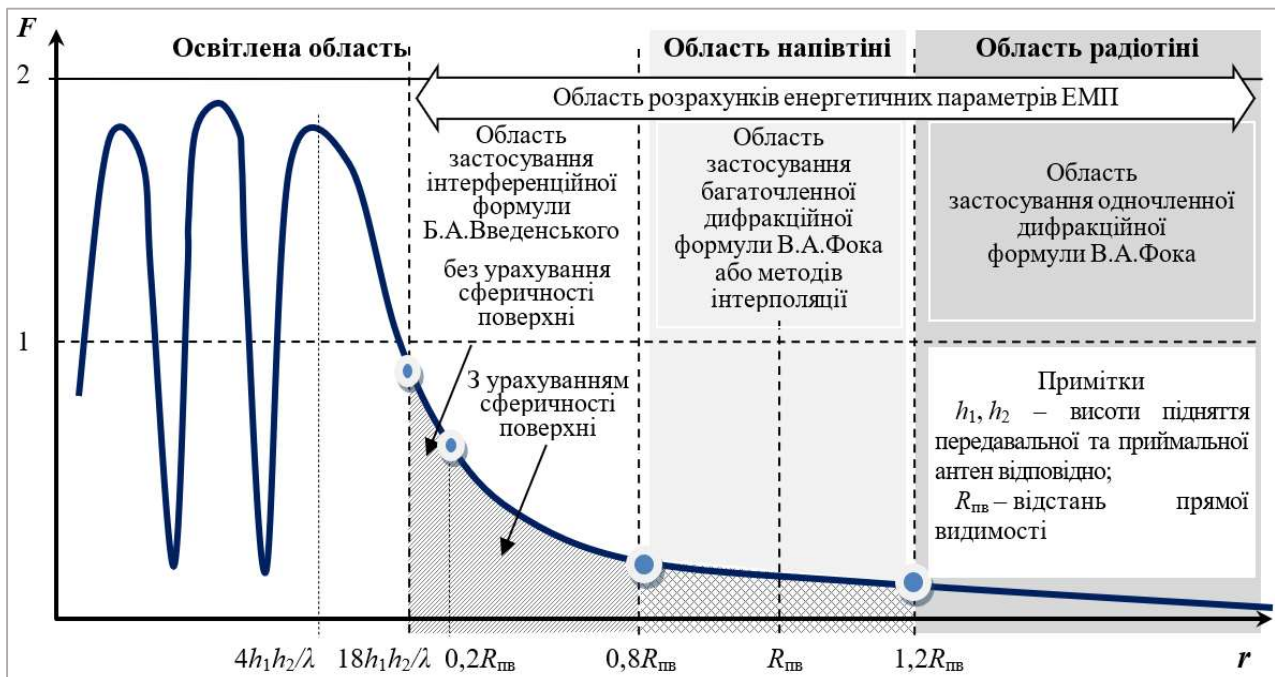


Рисунок 1 – Рівні кіберпростору [10]

Визначення множника ослаблення F на крайніх точках «зони напівтіні» не викликає особливих труднощів. Так, для нижньої крайньої точки ($r = 0,8 \cdot R_{\text{пв}}$) з метою визначення зазначеного множника можуть бути використані аналітичні вирази, засновані

на законах геометричної оптики, зокрема, інтерференційні формули Б. А. Введенського (рис. 1), що справедливі саме для ближньої зони до $r \leq (0,7 \dots 0,8) \cdot R_{\text{пв}}$ [4]. Водночас, для верхньої крайньої точки ($r = 1,2 \cdot R_{\text{пв}}$) множник F визначається за

одночленною дифракційною формулою В. А. Фока з використанням таблиць і номограм [5] або поліноміальних функцій, отриманих на їх основі. Цей спосіб є справедливим для дальньої зони ($r \geq 1,2 \cdot R_{\text{пв}}$), де ослаблення радіосигналу є більш відчутним [4; 5].

Визначення множника ослаблення F на межі зони

радіовидимості ($0,8 - 1,2 \cdot R_{\text{пв}}$) здійснюється з використанням методу лінійної інтерполяції. Пояснення до визначення множника ослаблення F у зоні напівтіні з використанням геометричної інтерпретації ділянки функції $F(r)$ лінійною функцією наведені на рис. 2.

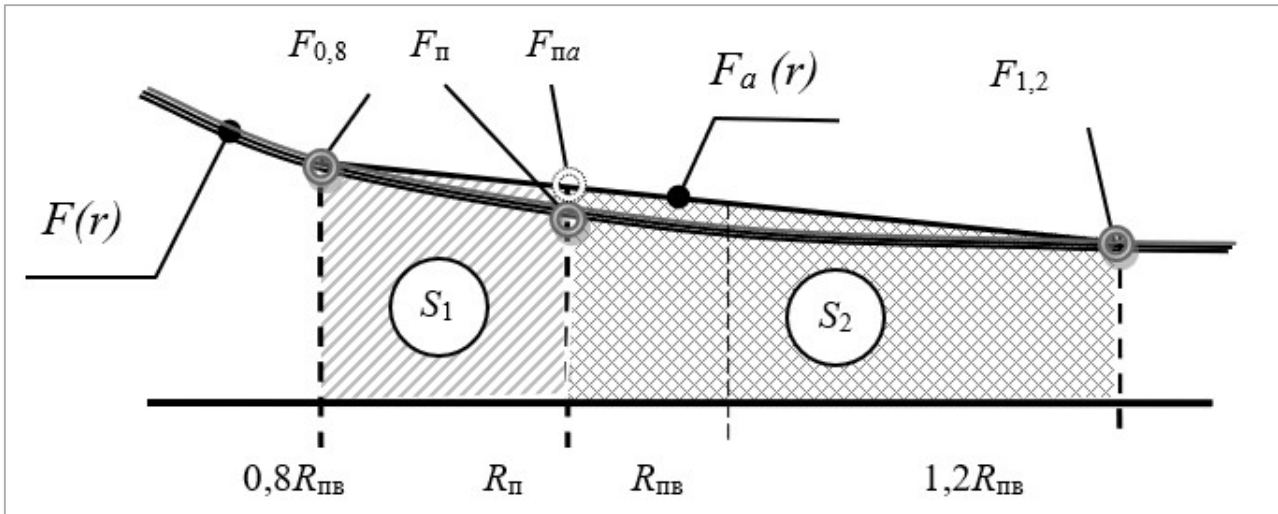


Рисунок 2 – До визначення множника ослаблення F у зоні напівтіні з використанням геометричної інтерпретації ділянки функції $F(r)$ лінійною функцією

З рис. 1 видно, що функція $F(r)$, що описує залежність множника ослаблення від відстані, в «зоні напівтіні» є монотонною. Тому доцільно використати метод її апроксимації лінійною функцією $F_a(r)$. Тоді, враховуючи приbliżу однаковість площ трапецій, утворюваних функціями $F(r)$ та $F_a(r)$ (рис. 2), для визначення значень множника $F_{\text{па}}$ в довільній точці в межах $0,8R_{\text{пв}} < R_{\text{п}} < 1,2R_{\text{пв}}$ скористаємось рівнянням для обчислення суми площ на основі відомих із геометрії виразів для обчислення площі трапецій:

$$S = S_1 + S_2, \quad (3)$$

де

$$S = \frac{F_{0,8} + F_{1,2}}{2} \cdot (1,2 \cdot R_{\text{пв}} - 0,8 \cdot R_{\text{пв}}),$$

$$S_1 = \frac{F_{0,8} + F_{\text{па}}}{2} \cdot (R_{\text{п}} - 0,8 \cdot R_{\text{пв}}),$$

$$S_2 = \frac{F_{\text{па}} + F_{1,2}}{2} \cdot (1,2 \cdot R_{\text{пв}} - R_{\text{п}}), \quad (4)$$

де $F_{0,8}$ та $F_{1,2}$ – значення множника ослаблення F на відстанях $0,8R_{\text{пв}}$ та $1,2R_{\text{пв}}$ відповідно;

$R_{\text{п}}$ – довільне значення відстані в межах «зони напівтіні» ($R_{0,8} < R_{\text{п}} < R_{1,2}$);

Звідки апроксимоване значення множника ослаблення на дальності $R_{\text{п}}$ можна визначити за виразом:

$$F_{\text{па}} = \frac{F_{0,8} \cdot (1,2 \cdot R_{\text{пв}} - R_{\text{п}}) + F_{1,2} \cdot (R_{\text{п}} - 0,8 \cdot R_{\text{пв}})}{0,4 \cdot R_{\text{пв}}}. \quad (5)$$

Отриманий вираз може бути використаний для визначення множника ослаблення ЕМП як радіозавад

на лінії «передавач радіозавад – засіб радіозв'язку», так і радіосигналу на лінії «радіопередавач – радіоприймач противника». З урахуванням викладеного вище, порядок визначення енергетичних параметрів радіозавад на межі зони радіовидимості передбачатиме таку послідовність:

формулюються ввідні дані щодо висот підйому антен засобів радіозв'язку та засобів радіозавад (для визначення відстаней прямої видимості), а також стосовно довжини хвилі, на якій здійснюється радіозв'язок (радіоподавлення);

за інтерференційною формулою Б. А. Введенського, що враховує кривизну Землі [4] та відношення довжини хвилі до висоти підйому антен, визначається множник ослаблення ($F_{0,8}$) для нижньої крайньої точки «зони напівтіні» ($r = 0,8 \cdot R_{\text{пв}}$);

за одночленною дифракційною формулою В. А. Фока [4; 5], в якій замість даних таблиць і номограм використовується поліноміальні функції, що за формою наближуються до реальних значень, визначається множник ослаблення ($F_{1,2}$) для верхньої крайньої точки «зони напівтіні» ($r = 1,2 \cdot R_{\text{пв}}$);

отримані граничні значення множника ослаблення ($F_{0,8}$ та $F_{1,2}$) підставляються у вираз (5), за яким визначається значення множника ослаблення $F_{\text{па}}$ в довільній точці, яка знаходиться в межах «зони напівтіні» ($R_{0,8} < R_{\text{п}} < R_{1,2}$);

отримане значення множника ослаблення $F_{\text{па}}$ підставляється у вираз (1) для визначення напруженості ЕМП радіосигналу (радіоперешкод) або у (2) для визначення густини потоку потужності радіосигналу (радіозавад) у заданій точці на межі зони радіовидимості.

Отже, вирази (1) та (2) визначають енергетичні параметри як для радіозавод на лінії «передавач радіозавод – засіб радіозв’язку», так і для радіосигналу на лінії «радіопередавач – радіоприймач противника». А вираз (5) визначає апроксимоване значення множника ослаблення ЕМП на довільній дальності в межах «зони напівтіні».

Висновки й перспективи подальших досліджень

Запропонований у статті метод визначення енергетичних параметрів радіозавод на межі зони радіовидимості, що використовує лінійну інтерполяцію функції для множника ослаблення електромагнітного поля, забезпечує підвищення оперативності визначення енергетичних параметрів

радіозавод на межі «зони напівтіні» завдяки зменшенню кількості обчислювальних процедур. Наведений метод доцільно використовувати під час розв’язання прикладних задач розрахунків та побудови ліній радіозв’язку, а також для прогнозування можливої завадової обстановки в районі бойових дій.

Напрямом подальших досліджень слід вважати проведення аналізу шляхів зменшення похибки лінійної інтерполяції в задачі оцінювання енергетичних параметрів радіозавод завдяки використанню методів кусково-лінійної або нелінійної інтерполяції. Окремі дослідження доцільно провести щодо впливу поляризаційних характеристик на енергетичні параметри радіосигналів засобів радіозв’язку (постановки радіозавод).

Список бібліографічних посилань

1. Sklar B., Harris F. J. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 3-ed ed. Chicago, USA : Pearson, 2021. 2287 p. 2. Наритник Т. М., Почерняєв В. М., Повхліб В. С. Цифрові радіорелейні та тропосферні лінії зв’язку. Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2019. С. 27–32. 3. Гурський Т. Г., Степаненко Є. О., Шишацький А. В. Оцінка граничної дальності зв’язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях. *Збірник наукових праць ВІПІ*. 2019. Вип. 1. С. 6–17. 4. Долуханов М. П. Распространение радиоволн: учебник для вузов. Москва : Связь, 1972. 335 с. 5. Грудинская Г. П., Родос Л. Я. Распространение радиоволн : учеб. Пособие. Москва : Высшая школа, 1967. 244 с. 6. Recommendation ITU-R M.1318-1 – Evaluation model for continuous interference from radio sources other than in the radionavigation-satellite service to the radionavigation-satellite service systems and networks operating in the 1164–1215 MHz, 1215–1300 MHz, 1559–1610 MHz and 5010–5 030 MHz bands. 2005–2007. 3 с. 7. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., перераб. И доп. Москва : Воениздат, 1989. 350 с. 8. Куприянов А. И.,

Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы : учеб. Пособие. Москва : Вузовская книга, 2007. 356 с. 9. Крилик Л. В., Богач І. В., Прокопова М. О. Обчислювальна математика. Інтерполяція та апроксимація табличних даних: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2013. 111 с. 10. Школин Ю. Д., Ярошенко В. С. Энергетический расчет радиолоний для решения задач радиоэлектронной защиты и безопасности связи. Ленинград : ВАС, 1986. 104 с. 11. Логачова Л. М., Бугрова Т. І. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв’язок: навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 236 с. 12. Марченко А. О., Войтко В. В., Кузьменко В. В. Рекомендації щодо розвитку антенних систем засобів радіорелейного зв’язку. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 2(47). С. 119–124. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-47-2-119-124. 13. Пільтій С. І. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Конспект лекцій: навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 171 с.

METHOD FOR DETERMINING THE ENERGY PARAMETERS OF RADIO INTERFERENCE AT THE BOUNDARY OF THE RADIO VISIBILITY ZONE

SHOVKOSHTYNI Ihor, Candidate of Military Science, Senior researcher, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9245-4111>

MARCHENKO Andrii, Candidate of Technical Sciences, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-1268-8012>

MINENKO Liudmyla, PhD, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0249-9856>

Formulation of the problem in general. During the propagation of electromagnetic waves in real conditions, the effect of their attenuation is observed, which is associated with the absorption or scattering of waves in the troposphere, as well as diffraction energy losses. This significantly affects the energy parameters of radio signals, the determination of which is considered particularly difficult at the edge of the radio visibility zone. The article aims to develop a method for determining the energy parameters of radio interference (radio signals) at the edge of the radio visibility zone using the linear interpolation method to provide operational calculations for assessing the electromagnetic situation.

Research methods. In the course of writing the article, the methods of systematic analysis of electromagnetic wave propagation processes and synthesis of the method for determining the energy parameters of radio signals were used. This methodological approach made it possible to obtain an expression for determining the electromagnetic field attenuation factor, which considers the propagation of electromagnetic waves in the surface layers of the troposphere with corresponding losses, in particular due to different polarisations of signals and receiving antennas.

Analysis of recent research and publications. Several studies and publications have been devoted to the determination of the energy parameters of radio signals, which indicate that such parameters are affected by the relative

position of transmission line elements, the directional characteristics of the antenna systems of radio communication and radio interference, and the conditions of electromagnetic wave propagation. At the same time, no due attention was paid to developing a methodological apparatus for determining the energy parameters of radio interference at the edge of the radio visibility zone to predict the possible interference situation in the combat zone.

Presenting the main material. It is proposed that the linear interpolation method be used to determine the energy parameters of radio signals at the boundary of the radio visibility zone, which is covered by a range of ranges that depend on the line-of-sight distance. It is established that the energy parameters of radio interference can be estimated through the electromagnetic field strength at a given point in space or the power flux density (Condition-Pointing vector) of radio signals at the location of the receiving antenna. The expression for the approximated value of the electromagnetic field attenuation factor at an arbitrary range within the «penumbra zone» is obtained. The procedure for determining the energy parameters of radio signals at the edge of the radio visibility zone has been developed.

Elements of scientific novelty. The method can increase the efficiency of determining the energy parameters of radio interference at the edge of the radio visibility zone by reducing the number of computational procedures.

Theoretical and practical significance of the article. This method is advisable for solving applied problems of building radio communication lines, as well as for predicting the possible interference situation in the area of hostilities.

Conclusion and the perspectives of future research. The proposed method for determining the energy parameters of radio interference on the border of the radio visibility zone, which uses linear interpolation of the function for the electromagnetic field attenuation multiplier, provides an increase in the efficiency of determining the energy parameters of radio interference on the border of the «penumbra zone».

Keywords: radio signal, interference, energy parameters, propagation of electromagnetic waves, electromagnetic field, radio visibility zone, line-of-sight range, attenuation factor.

References

1. Sklar, B., Harris, F. J., (2021). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3-ed ed. Chicago, USA : Pearson, 2287.
2. Narytnyk, T. M., Pochernyayev, V. M., Povkhlil, V. S., (2019) Digital radio relay and tropospheric communication lines. Odesa: ONAZ im. O. S. Popova 27-32.
3. Hurskyi, T. G., Stepanenko, E. O., Shishatskyi, A. V., (2019). Evaluation of the boundary communication range of modern radio and radio relay links. *Zbirnyk naukovykh prats VITI*. (1), 6–17.
4. Dolukhanov, M. P. (1972). Radio wave propagation: uchebnyk dlya vuzov. Moscwa : Svyaz, 335.
5. Grudinskaya, G. P., Rodos, L. Y., (1967). Radio wave propagation : uchebnoe posobie. Moskva : Vysshaya shkola, 244.
6. Recommendation ITU-R M.1318-1 – Evaluation model for continuous interference from radio sources other than in the radionavigation-satellite service to the radionavigation-satellite service systems and networks operating in the 1164-1215 MHz, 1215–1300 MHz, 1559–1610 MHz and 5010–5 030 MHz bands. (2005–2007).
7. Paliy, A. I., (1989). Radio-electronic warfare. 2nd ed. Moscwa : Voenizdat. 350.
8. Kupriyanov, A. I., Sakharov, A. V., (2007). Theoretical bases of radio electronic warfare : navchal'nyy posibnyk . Moscow : Vuzovskaya kniga.
9. Krylyk, L. V., Bogach, I. V., Prokopova, M. O., (2013). Computational mathematics. Interpolation and approximation of tabular data: navchal'nyy posibnyk. Vinnytsia: VNTU, 111.
10. Shkolin, Yu. D., Yaroshenko, V. S., (1986). Energy calculation of radio lines to solve radio-electronic protection and communication security problems. Leningrad : VAS. 104.
11. Logacheva, L. M., Bugrova, T. I., (2019). Propagation of terrestrial radio waves and mobile communication: navchal'nyy posibnyk. Zaporizhzhia : ZNTU.
12. Marchenko, A. O., Voytko, V. V., Kuz'menko, V. V., (2023). Recommendations for the development of antenna systems for radio relay communication. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2(47), 119–124. DOI: 10.33099/2311-7249/2023-47-2-119-124.
13. Piltyai, S. I., (2023). Electrodynamics and propagation of radio waves. Konspekt lektsiy : navchal'nyy posibnyk. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Рукопис надійшов до редакції 25.03.2025
 Рукопис прийнято до друку після рецензування 07.04.2025
 Дата публікації 30.04.2025