

УДК: 623.62

DOI: 10.33099/2311-7249/2025-53-2-95-100

ШОВКОШИТНИЙ Ігор Іванович,

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

МАРЧЕНКО Андрій Олександрович,

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

ГРОЗОВСЬКИЙ Роман Іванович,

кандидат військових наук,
Національний університет оборони України, Київ, Україна,
<https://orcid.org/0000-0001-9037-787X>

АНАЛІТИЧНО-ЕМПІРИЧНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ОСЛАБЛЕННЯ СИГНАЛІВ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті розглядається методичний апарат визначення рівня ослаблення радіосигналів під час поширення електромагнітних хвиль в умовах завадової обстановки, створюваної приймачам сигналів супутникових радіонавігаційних систем. **Метою статті** є розроблення аналітично-емпіричного методу оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем для прогнозування очікуваної завадової обстановки та підвищення точності визначення енергетичних параметрів радіозавад.

Методи дослідження. Під час написання статті застосовано методи системного аналізу процесів поширення електромагнітних хвиль і синтезу аналітично-емпіричного методу оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем. Зазначений методологічний підхід дав змогу отримати вирази для визначення коефіцієнту поглинання з урахуванням отриманого множника ослаблення радіозавади.

Отримані результати дослідження. Проведено аналіз низки особливостей, які потрібно враховувати під час прогнозування завадової обстановки, що створюється приймачам сигналів супутникових радіонавігаційних систем. Запропоновано способи врахування ослаблення сигналів під час поширення електромагнітних хвиль на трасах «навігаційний супутник – радіоприймач» і «передавач радіоперешкод – радіоприймач». Наведено особливості визначення ослаблення радіозавад, створюваних наземними засобами радіоелектронної боротьби і засобами, розміщеними на повітряних платформах. Математично формалізовано аналітично-емпіричний метод оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем завдяки поєднанню класичних виразів теорії електродинаміки та поширення електромагнітних хвиль, що характеризують енергетичні параметри радіосигналів і вирази для визначення коефіцієнту поглинання з урахуванням отриманого множника ослаблення радіозавади. Показано, що використання запропонованих виразів не вимагає значної кількості вхідних даних і дає змогу підвищити точність визначення енергетичних параметрів радіозавад приймачам сигналів.

Елементом наукової новизни є те, що запропонований метод може бути використаний для врахування ослаблення радіосигналів під час поширення електромагнітних хвиль на трасах «навігаційний супутник – радіоприймач» і «передавач радіоперешкод – радіоприймач».

Теоретична й практична значущість викладеного у статті. Поєднання класичних виразів із теорії електродинаміки і поширення електромагнітних хвиль, що характеризують енергетичні параметри сигналів, та емпіричного виразу для визначення коефіцієнту поглинання з урахуванням отриманого множника ослаблення радіозавади дає змогу математично формалізувати запропонований аналітично-емпіричний метод оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем. Використання такого методу може підвищити точність визначення енергетичних параметрів радіозавад приймачам сигналів супутникових радіонавігаційних систем.

Ключові слова: супутникова радіонавігаційна система, електромагнітні хвилі, радіосигнал, енергетичні параметри, радіозавада, множник ослаблення, коефіцієнт поглинання.

Вступ

У сучасних умовах радіонавігаційні системи активно впроваджуються у повсякденну і бойову діяльність військ. Виконання більшості навігаційних завдань здебільшого передбачає використання приймачів сигналів супутникових радіонавігаційних систем (далі – СРНС), номенклатура яких постійно розширюється. Водночас, зі зростанням ролі СРНС триває розвиток засобів радіоелектронної боротьби (далі – РЕБ) з такими системами, оскільки їх подавлення значно знижуватиме спроможності протидіючої сторони з виконання навігаційних завдань.

Постановка проблеми. У процесі розроблення та застосування приймачів сигналів СРНС, а також засобів РЕБ з такими системами, виникає потреба у прогнозуванні очікуваної завадової обстановки з визначенням:

реальної дальності дії засобів РЕБ у конкретних умовах обстановки та енергетичних параметрів радіозавод приймачам сигналів СРНС;

енергетичних параметрів навігаційних полів і рівня завадозахищеності засобів (систем) приймання сигналів СРНС.

Під час оцінювання можливої завадової обстановки частіше використовуються аналітичні вирази, в яких дальність дії радіотехнічних засобів і засобів постановки радіозавод обирається на підставі їхніх тактико-технічних характеристик, що не завжди є виправданим. Тому висновок про можливість подавлення радіоприймача можна зробити лише за результатами визначення та порівняння значень енергетичних показників радіосигналів і радіозавод у конкретних точках прийому з урахуванням ослаблення сигналів, що пов'язане із поглинанням або розсіюванням електромагнітних хвиль (далі – ЕМХ) у тропосфері, а також енергетичними втратами завдяки ефекту дифракції ЕМХ [1–3].

Інженерні розрахунки дають змогу з певною точністю визначити параметри електромагнітного поля (далі – ЕМП). Вони ґрунтуються на моделях методах і методиках, використання яких потребує врахування багатьох технічних характеристик і низки суттєвих чинників, що характеризують середовище поширення ЕМХ у просторі. Такий підхід дає змогу доволі точно визначити дальність дії радіотехнічних засобів і засобів постановки радіозавод у конкретних умовах обстановки, але можуть потребувати значних обчислювальних і часових ресурсів, що під час оперативних розрахунків може бути неприйнятним.

Отже розвиток методичного апарату прогнозування завадової обстановки, створюваної приймачам сигналів СРНС, з урахуванням особливостей визначення рівня ослаблення радіосигналів під час поширення ЕМХ у просторі, є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням визначення енергетичних параметрів радіосигналів і прогнозування завадової обстановки присвячена низка досліджень і публікацій. Зокрема, у [2; 3] наведено класичні методи геометричної оптики,

положення теорії електродинаміки та поширення ЕМХ, які можуть використовуватись під час визначення параметрів радіоліній. У зазначених джерелах наведені вирази для інженерних розрахунків енергетичних параметрів радіосигналів з урахуванням множника їх ослаблення, значення якого може змінюватись залежно від конкретних умов поширення ЕМХ. Практичне використання наведених виразів має певні обмеження, а результати, отримані завдяки ним, передбачають урахування багатьох вхідних даних для кожного конкретного випадку та користування табличними даними і номограмами.

У публікаціях [4–6] розглядається проблематика поширення ЕМХ лише для радіорелейних, тропосферних ліній та мобільного зв'язку, а питання впливу засобів РЕБ на супутникові навігаційні системи не розглядаються.

Слід зазначити, що проблематика радіоелектронного захисту та РЕБ досліджується вже довгий період. Так у [7–9] наведені відомі аналітичні вирази для оцінювання енергетичних характеристик активної радіопротидії і визначення дальності дії радіозавод із припущенням, що радіосигнали та радіозаводи поширюються у вільному просторі. Наприклад у [9] зазначено, що за потреби врахування затухання ЕМП на трасах (напрямах) поширення ЕМХ може бути використаний певний множник, значення якого залежить від питомого ослаблення ЕМП на одиницю відстані, але порядок його визначення не наводиться. Розглянуті підходи не дають змоги оперативно отримати результати визначення зазначених параметрів і є доволі громіздкими, що обмежує можливість їх використання під час розв'язання практичних задач.

Відомі також часткові методики та статистичні моделі, отримані на основі аналітичної апроксимації результатів практичних вимірювань, що використовуються для визначення меж зони гарантованого приймання або оцінювання безперервних радіозавод [10]. Однак вони розроблені для певного типу місцевості та справедливі лише для окремих смуг радіодіапазону, а тому не можуть бути використані для частотного діапазону СРНС (1,2 – 1,5 ГГц).

Що стосується оцінювання завадової обстановки, в різних джерелах наводиться або аналіз наявних і перспективних засобів радіозавод приймачам сигналів СРНС, або аналіз технічних характеристик навігаційних приймачів і граничних значень рівнів завод, за яких працездатність цих приймачів зберігатиметься [11]. Проте зазначені дані є лише частковими вхідними даними для оцінювання завадової обстановки.

Метою статті є розроблення аналітично-емпіричного методу оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем для прогнозування очікуваної завадової обстановки та підвищення точності визначення енергетичних параметрів радіозавод.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час оцінювання завадової обстановки, створюваної приймачем сигналів СРНС, потрібно комплексно враховувати низку особливостей:

поширення ЕМХ від супутника до приймача відбувається через різні шари атмосфери, зміна властивостей якої може певним чином впливати на рівень навігаційного сигналу;

електромагнітні хвилі завад поширюється в нижніх щільних шарах тропосфери з незначною втратою енергії завдяки певного впливу земної поверхні та дифракційного ефекту;

радіоподавлення приймача сигналів СРНС може відбуватись лише в умовах прямої радіовидимості між цим приймачем і передавачем завад;

можливість зриву виконання навігаційних завдань залежить від взаємного розташування радіопередавача (навігаційного супутника), радіоприймача корисних сигналів, передавача радіозавад, співвідношення енергетичних потенціалів передавачів, а також умов поширення ЕМХ на трасах (напрямах) «навігаційний супутник – радіоприймач» і «передавач радіозавад – радіоприймач».

Загалом для засобів СРНС завадова обстановка, що створюється засобами РЕБ, може характеризуватися такими самими енергетичними показниками, які використовуються для визначення трас поширення ЕМХ. Зокрема, під час визначення енергетичних показників часто використовуються щільність потоку потужності ЕМП та потужність сигналу на вході приймального пристрою з напруженістю у заданій точці простору, які аналітично пов'язані між собою і визначаються за такими виразами [1; 2]:

$$P = \frac{P_c \cdot G_{\text{пер}}}{4\pi \cdot d^2} \cdot F^2, \quad (1)$$

$$P_c^{\text{вх}} = P_c \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^2 \cdot F^2, \quad (2)$$

де $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{пр}}$ – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антени відповідно;

P – щільність потоку потужності в місці розташування приймальної антени (вектор Умова-Пойнтинга), Вт/м²;

d – відстань від передавача до точки прийому, м;

λ – довжина ЕМХ, м;

P_c і $P_c^{\text{вх}}$ – потужність передавача та потужність радіосигналу на вході радіоприймача відповідно, Вт;

F – множник ослаблення ЕМП сигналів ($0 \leq F \leq 1$).

Множник F фактично є допоміжним енергетичним показником, що характеризує ступінь ослаблення ЕМП під час поширення ЕМХ в реальних умовах порівняно із ослабленням, яке спостерігалось б в умовах вільного простору [2]. Потреба в його врахуванні також пояснюється значною відмінністю протяжності лінії радіонавігації (понад 20 тис. км) та лінії «передавач завад – приймач сигналів СРНС» (одинаці–десятки км). Тому значення показника F для

сигналу СРНС і радіозавад навіть за однакових умов поширення ЕМХ будуть різними.

Для визначення ослаблення навігаційного сигналу F_c на трасі (напрямку) «навігаційний супутник – радіоприймач» слід урахувати, що супутникові радіонавігаційні засоби працюють у дециметровому діапазоні (19–24 см), у якому ЕМХ доволі легко поширюються в іоносфері без розсіювання та суттєвих втрат. Відповідно до багаторічного досвіду експлуатації ліній радіозв'язку та радіонавігації у достатньо широкому діапазоні частот, прийнято вважати, що ЕМХ довжиною понад 10 см у будь-яких умовах (сильна злива, туман, сніг, град, хмари та інші метеорологічні явища в нижніх шарах тропосфери) відчутного поглинання у тропосфері не зазнають, а поглинання у водяних парах (гідрометеорах) стає особливо відчутним для ЕМХ довжиною 3–5 см [1; 2]. Проте, з метою точнішого врахування впливу атмосфери на ослаблення корисного сигналу, доцільно використати графік втрат завдяки молекулярному поглинанню в кисні повітря і парах води, що наведений у [2]. З цього графіка, для кутів підвищення навігаційного супутника 90° та 30°, ці втрати на частотах 1,2 і 1,5 ГГц становитимуть 0,07 дБ (1,008 рази) і 0,12 дБ (1,014 рази) відповідно, що відповідатиме значенням множника ослаблення навігаційного сигналу $F_c \approx 0,992$ і $F_c \approx 0,986$. Отримані значення є практично незмінними і можуть бути враховані, зокрема, під час уточнення рівня сигналу на вході навігаційного приймача, який з урахуванням квадрату множника F_c (1), (2) зменшуватиметься на 2,5 % та 3 % відповідно.

Під час оцінювання ослаблення радіозавади на трасі (напрямку) «передавач радіозавад – радіоприймач» слід урахувати, що радіоподавлення корисного навігаційного сигналу відбувається в межах прямої радіовидимості на відносно незначних відстанях у нижньому шарі тропосфери, в якому можливе деяке поглинання енергії радіозавади завдяки її часткового розсіювання на неоднорідностях тропосфери та проникнення у верхні шари земної поверхні. Отже, для визначення множника ослаблення ЕМП радіозавади $F_{\text{п}}$ можна скористатися інтерференційною формулою Введенського для випадку високо піднятих антен ($h > \lambda$) [2]:

$$F_{\text{п}} \approx \frac{4\pi \cdot h_{\text{пер}} \cdot h_{\text{пр}}}{\lambda \cdot d}, \text{ при } \frac{18 \cdot h_{\text{пер}} \cdot h_{\text{пр}}}{\lambda} \leq d < R_{\text{пв}}, \quad (3)$$

де $h_{\text{пер}}$ і $h_{\text{пр}}$ – висоти підняття антен передавача завад і навігаційного приймача;

$R_{\text{пв}}$ – дальність прямої видимості в умовах нормальної атмосферної рефракції радіохвиль.

У випадку, коли $h \gg \lambda$, умова, наведена у виразі (3), може не виконуватись, що зокрема характерно для засобів РЕБ, розміщених на повітряних платформах. У такому разі використання формули Введенського буде неможливим. Тому множник $F_{\text{п}}$ пропонується визначати в інший спосіб з урахуванням погонного молекулярного поглинання ЕМХ в атмосфері.

Використаємо графік залежності коефіцієнта поглинання ЕМХ у кисні і парах води від частоти, що наведений у [2], для діапазону частот від 1 ГГц ($\lambda=30$ см) до 500 ГГц ($\lambda=0,6$ мм). Відповідно до графіка поглинання ЕМХ у парах води на частотах роботи СРНС не відбувається, а у кисні повітря становить

приблизно 0,007 дБ/км (1,0008 рази). З урахуванням цього коефіцієнта та нахильної відстані між піднятою високо над землею поверхнею антени передавача радіозавади і антеною приймача сигналів СРНС (рис. 1) отримуємо такий вираз:

$$F_{\Pi} \approx 10^{\frac{\gamma_0 \cdot d'_{\Pi}}{20}}, d'_{\Pi} = \sqrt{d^2 + (h_{\text{пер}} - h_{\text{пр}})^2}, \text{ при } \frac{18 \cdot h_{\text{пер}} \cdot h_{\text{пр}}}{\lambda} > d, \quad (4)$$

де γ_0 – коефіцієнт поглинання у кисні повітря (погонне затування), дБ/км;

d'_{Π} – нахильна відстань між передавачем радіозавади і приймачем сигналів СРНС, км.

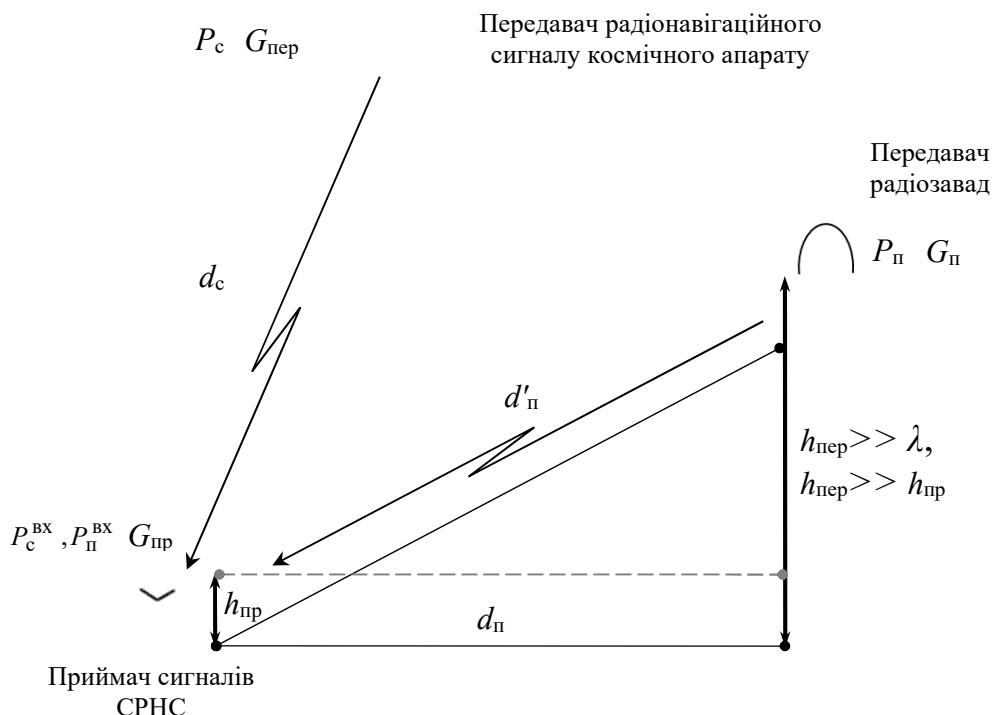


Рисунок 1 – До визначення множника ослаблення радіозавади F_{Π} для випадку $h_{\text{пер}} \gg \lambda$

Слід зазначити, що множник ослаблення враховуватиме погонне загасання ЕМХ, значення якого отримані з графіків, побудованих для конкретного значення температури та вологості повітря. Але іноді може знадобитись урахування

сезонних або добових метеорологічних умов, що впливають на характер поширення ЕМХ. Тоді значення коефіцієнта поглинання γ_0 можна більш точно оцінити за допомогою емпіричного виразу (для діапазону $f \leq 54$ ГГц), наведеного у [12]:

$$\gamma_0 = \left[\frac{7,2 r_t^{2,8}}{f^2 + 0,34 r_p^2 r_t^{1,6}} + \frac{0,62 \xi_3}{(54 - f)^{1,16 \xi_1} + 0,83 \xi_2} \right] \cdot f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де f – частота, ГГц;

$r_p = p/1013$ – коефіцієнт, що враховує загальний тиск повітря p , гПа;

$r_t = 288/(273 + t)$ – коефіцієнт, що враховує температуру повітря t (°C), при цьому, якщо необхідні

дані щодо температури недоступні, її середні значення можуть бути взяті з карт, наведених у [12];

$\xi_1 - \xi_3$ – емпіричні коригуючі коефіцієнти, які визначаються за виразами:

$$\begin{cases} \xi_1 = \varphi(r_p, r_t; a = 0,0717; b = 1,8132; c = 0,0156; d = -1,6515), \\ \xi_2 = \varphi(r_p, r_t; a = 0,5146; b = -4,6368; c = -0,1921; d = -5,7416), \\ \xi_3 = \varphi(r_p, r_t; a = 0,3414; b = -6,5851; c = 0,2130; d = -8,5854), \\ \varphi(r_p, r_t; a; b; c; d) = r_p^a \cdot r_t^b \cdot \exp[c \cdot (1 - r_p) + d \cdot (1 - r_t)] \end{cases} \quad (6)$$

Отже, поєднання класичних виразів з теорії електродинаміки та поширення ЕМХ, що характеризують енергетичні параметри сигналів (1) і (2) та емпіричного виразу для визначення коефіцієнту поглинання (5) з урахуванням отриманого множника ослаблення радіозавади (4) дає змогу математично формалізувати запропонований аналітично-емпіричний метод оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Проведений аналіз низки особливостей, які потрібно комплексно враховувати під час оцінювання завадової обстановки, створюваної приймачам сигналів супутникових радіонавігаційних систем, дав змогу запропонувати способи врахування ослаблення радіосигналів під час поширення електромагнітних хвиль на трасах «навігаційний супутник – радіоприймач» і «передавач радіоперешкод – радіоприймач». Наведено особливості визначення

рівня ослаблення електромагнітного поля радіозавад, створюваних наземними засобами радіоелектронної боротьби і засобами, розміщеними на повітряних платформах. Також показано, що використання запропонованого аналітично-емпіричного методу оцінювання ослаблення сигналів супутникових радіонавігаційних систем не вимагає значної кількості вихідних даних і дає змогу підвищити точність визначення енергетичних параметрів радіозавад приймачам сигналів СРНС приблизно на 3 %, а у разі врахування конкретних метеорологічних умов – і дещо більше.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на пошук шляхів підвищення оперативності та точності визначення просторово-енергетичних параметрів електромагнітного поля радіозавад, створюваних радіонавігаційним системам інших частотних діапазонів, а також дослідженню проблеми підвищення завадостійкості радіоелектронних систем і засобів, призначених для вирішення навігаційних завдань.

Список бібліографічних посилань

1. Sklar B., Harris F. J. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 3-ed ed. Chicago, USA : Pearson, 2021. 2287 p. 2. Грудинская Г. П., Родос Л. Я. Распространение радиоволн : учеб. пособие. Москва : Высшая школа, 1967. 244 с. 3. Пільтій С. І. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Конспект лекцій : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 171 с. 4. 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. 5. Логачова Л. М., Бугрова Т. І. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок: навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 236 с. 6. Гурський Т. Г., Степаненко Є. О., Шишацький А. В. Оцінка граничної дальності зв'язку на сучасних радіо- та радіорелейних лініях. Збірник наукових праць ВІТІ. Київ, 2019. Вип. 1. С 6–17. 7. Школин Ю. Д., Ярошенко В. С. Энергетический расчет радиолиний для решения задач радиоэлектронной защиты и безопасности связи. Ленинград : ВАС, 1986. 104 с. 8. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., перераб.

и доп. Москва : Воениздат, 1989. 350 с. 9. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы : учеб. пособие. Москва : Вузовская книга, 2007. 356 с. 10. Шовкоштитний І. І., Марченко А. О., Міненко Л. М. Метод визначення енергетичних параметрів радіозавад на межі зони радіовидимості. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2025. № 52(1). С. 102–107. DOI: 10.33099/2311-7249/2025-52-1-102-107. 11. Водяних А. А., Тимчук В. Ю. Технічна характеристика навігаційної апаратури СН-3003М. Військово-технічний збірник. Львів : НАСВ ім. гетьмана Петра Сагайдачного. № 1(4), 2011. С. 198-205. 12. 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.

ANALYTICAL AND EMPIRICAL METHOD FOR ESTIMATING THE SIGNAL ATTENUATION OF SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEMS

SHOVKOSHTYNI Ihor, doctor of technical sciences, 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>

HROZOVSKIY Roman, PhD in military sciences, National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-9037-787x>

Formulation of the problem in general. The article deals with the methodological apparatus for determining the level of radio signal attenuation during electromagnetic wave propagation in the interference conditions created by satellite radio navigation system signal receivers. **The purpose of the article** is to develop an analytical and empirical method for assessing the attenuation of satellite radio navigation system signals in order to predict the expected interference environment and improve the accuracy of determining the energy parameters of radio interference.

Research methods. In the course of writing this article, systematic analysis of electromagnetic wave propagation processes and synthesis of an analytical and empirical method for assessing the signal attenuation of satellite radio navigation systems were applied. This methodological approach has made it possible to obtain expressions for determining the absorption coefficient, considering the obtained radio interference attenuation factor.

Literature review. There are known methods and models based on analytical approximation of practical measurement results used to determine the boundaries of the guaranteed reception area or to assess continuous radio

interference. However, they are developed for a specific terrain type and are valid only for certain radio bands. Different sources provide either an analysis of existing and prospective means of radio interference to the receivers of satellite radio navigation system signals or an analysis of the technical characteristics of navigation receivers and the limit values of interference levels at which the operability of these receivers will be maintained. However, these data are only partial inputs for assessing the interference situation.

Research results. The article analyses several features that should be considered when predicting the interference situation created by the receivers of satellite radio navigation systems. Ways to evaluate the signal attenuation during the propagation of electromagnetic waves on the routes «navigation satellite – radio receiver» and «radio interference transmitter – radio receiver» are proposed. The peculiarities of determining the attenuation of radio interference created by ground-based electronic warfare equipment and equipment deployed on airborne platforms are presented. An analytical and empirical method for estimating the signal attenuation of satellite radio navigation systems is mathematically formalised by combining the classical expressions of the theory of electrodynamics and electromagnetic wave propagation, which characterise the energy parameters of radio signals and empirical expressions for determining the absorption coefficient, taking into account the obtained radio interference attenuation factor. It is shown that using the proposed expressions does not require a significant amount of input data and makes it possible to improve the accuracy of calculations of the energy parameters of radio interference to signal receivers.

Research novelty. An aspect of scientific novelty is that the proposed method can be used to consider the attenuation of radio signals during the propagation of electromagnetic waves on the routes «navigation satellite – radio receiver» and «radio interference transmitter – radio receiver».

Theoretical and practical significance. The combination of classical expressions from the theory of electrodynamics and electromagnetic wave propagation that characterise the energy parameters of signals and the expression for determining the absorption coefficient, taking into account the obtained radio interference attenuation factor, makes it possible to mathematically formalise the proposed analytical and empirical method for estimating the signal attenuation of satellite radio navigation systems. This method can improve the accuracy of determining the energy parameters of radio interference to the receivers of satellite radio navigation systems.

Conclusion and future work. The analysis of several features that need to be comprehensively considered when assessing the interference situation created by satellite radio navigation system signal receivers has made it possible to propose ways to evaluate the attenuation of radio signals. Using the proposed analytical and empirical method for assessing the signal attenuation of satellite radio navigation systems does not require a significant amount of initial data. It makes it possible to increase the accuracy of determining the energy parameters of radio interference to signal receivers. Further research can be aimed at solving the problem of expanding the interference resistance of radio electronic systems and the means intended to solve navigation problems.

Keywords: satellite radio navigation system, electromagnetic waves, radio signal, energy parameters, radio interference, attenuation factor, absorption coefficient.

References

1. Sklar, B., Harris, F. J., (2021). *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. 3-ed ed. Chicago, USA : Pearson, 2287.
2. Grudinskaya, G. P., Rodos, L. Y., (1967) Radio wave propagation : uchebnoe posobie. Moskva : Vysshaya shkola. 244.
3. Pilyai, S. I., (2023). Electrodynamics and propagation of radio waves. Konspekt lektsiy : navchal'nyy posibnyk. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 171.
4. 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.
5. Logacheva, L. M., Bugrova, T. I., (2019). Propagation of terrestrial radio waves and mobile communication: navchal'nyy posibnyk. Zaporizhzhia: ZNTU, 236.
6. 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.
7. Shkolin, Yu. D., Yaroshenko, V. S., (1986). Energy calculation of radio lines to solve radio-electronic protection and communication security problems. Leningrad : VAS. 104.
8. Paliy, A. I., (1989). Radio-electronic warfare. 2-nd ed. Moswa : Voenizdat. 350.
9. Kupriyanov, A. I., Sakharov, A. V., (2007). Theoretical bases of radio electronic warfare : navchal'nyy posibnyk . Moscow : Vuzovskaya kniga. 356.
10. Shovkoshtyni, I. I., Marchenko, A. O., Minenko, L. M. (2025). A method for determining the energy parameters of radio interference at the boundary of the radio visibility zone. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. Kyiv : NUOU, 52(1), 102–107. DOI: doi.10.33099/2311-7249/2025-52-1-102-107.
11. Odyanykh, A. A., Tymchuk, V. Yu., (2011). Technical characteristics of navigation equipment CH-3003M. *Vys'kovo-tekhnichnyy zbirnyk*. L'viv : NASV im. het'mana Petra Sahaydachnoho. 1 (4), 198–205.
12. 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.

Рукопис надійшов до редакції	28.05.2025
Рукопис прийнято до друку після рецензування	08.07.2025
Дата публікації	29.08.2025