

БОЙОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОВТ

УДК 621.391

Ю.В. Журавський

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова НАУ, Житомир

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РАДІОПОДАВЛЕННЯ В УМОВАХ ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПЕРЕДАВАЧА СИГНАЛУ

У статті виведено закон розподілу потужності сигналу на вході приймача в умовах похибок визначення координат передавача сигналу. На основі цього закону та обґрунтування ймовірнісної форми енергетичної умови подавлення одержано розв'язок задачі оцінювання ефективності радіоподавлення. Фізична оцінка ефективності радіоподавлення в таких умовах дорівнює ймовірності подавлення приймача (приймачів). Достовірність отриманих результатів забезпечується їх збіжністю з відомими формулами в граничних випадках. Результати досліджень дозволяють зменшувати похибку оцінювання ефективності радіоподавлення.

Ключові слова: радіоподавлення, ефективність, похибки, координати, передавач.

Вступ

Постановка проблеми. Оцінювання ефективності радіоподавлення (РП) є досить важливою задачею, оскільки на ній ґрунтуються розв'язки задач більш високого рівня. На даний час відомі методи дозволяють оцінювати ефективність РП лише за умов, коли всі початкові дані є точно відомими. Такі умови дещо суперечать практиці, тому що координати передавачів і приймачів сигналів, як правило, визначаються з похибками. Нехтування їх врахуванням призводить до того, що сама оцінка ефективності РП визначається не точно, а з певними похибками. Вони, у свою чергу, ще більше поглиблюються та тиражуються в кінцевих результатах задач більш високого рівня, що може призвести до істотних прорахунків, прийняття хибних рішень. Таким чином, розробка методів оцінювання ефективності РП в умовах похибок визначення координат є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання оцінювання ефективності РП розглядаються в багатьох джерелах, у тому числі в останніх узагальнених роботах у даній галузі [1–4], але наведені там підходи стосуються умов, коли координати (відстані) є точно відомими. Розв'язок задачі оцінювання ефективності РП в умовах невизначеності координат приймачів [5] дозволяє приблизно отримати необхідну оцінку без будь-якої інформації щодо цих координат. Але зазначений розв'язок [5] не відповідає умовам похибок визначення місцезнаходження, оскільки в даному разі є можливість врахувати певну, хоча і неточну, інформацію про координати. Підходи до оцінювання показників в умовах похибок [6]

не враховують специфіки впливу радіоелектронних перешкод, і тому не можуть бути безпосередньо використані для розв'язання задачі дослідження.

Формулювання мети статті. Отже, однією з не вирішених раніше частин загальної проблеми оцінювання ефективності РП є її оцінювання в умовах похибок визначення координат. Відповідно, для забезпечення поступовості метою статті доцільно обрати розв'язання найбільш простого варіанта цієї задачі (для умов похибок визначення координат передавача сигналу), а також аналіз властивостей отриманої оцінки ефективності РП.

Виклад основного матеріалу

Нехай: у декартовій системі координат розглядаються наземні приймачі та передавач сигналів ультракороткохвильового діапазону, антени яких в азимутальній площині мають кругову діаграму спрямованості; поверхня, на якій розміщено усі засоби, є плоскою; похибки визначення обох координат передавача незалежні та описуються нормальним законом розподілу; середньоквадратичне відхилення σ обох координат передавача x_{nc} , y_{nc} відносно їх математичних сподівань $m_{x_{nc}}$, $m_{y_{nc}}$ є однаковим: $\sigma_{ncx} = \sigma_{ncy} = \sigma_{nc}$. Необхідно оцінити ефективність РП у даних умовах.

Розглянемо спочатку енергетичну умову подавлення, яка є основою оцінювання ефективності РП [1]. Згідно з цією умовою приймач вважається подавленим, якщо виконується така нерівність:

$$P_n > K_n P_c, \quad (1)$$

де P_n , P_c – потужність перешкоди та сигналу на вході приймача, Вт;

K_n – коефіцієнт подавлення.

Оскільки в задачах оцінювання ефективності РП затрати (енергетичні, апаратурні тощо) вважаються постійними, ефективність оцінюється безпосередньо за ефектом [3]. Тому з урахуванням (1) ефективність РП одного приймача E_1 може бути описана однією функцією

$$E_1 = 1 \left[\frac{P_n}{K_n} - P_c \right]. \quad (2)$$

Значення P_c і P_n розраховуються відомим чином [6]:

$$P_c = \frac{P_{nc} G_{nc} A_e}{4\pi R_c^2} = \frac{P_{nc} G_{nc} A_e}{4\pi R^2(x_{nc}, y_{nc}, x_{np}, y_{np})}, \quad (3)$$

$$P_n = \frac{P_{nn} G_{nn} A_e}{4\pi R_n^2} = \frac{P_{nn} G_{nn} A_e}{4\pi R^2(x_{nn}, y_{nn}, x_{np}, y_{np})}, \quad (4)$$

де P_{nc} , P_{nn} – потужність передавачів сигналу та перешкоди, Вт;

G_{nc} , G_{nn} – коефіцієнт підсилення антен передавачів сигналу та перешкоди;

A_e – ефективна площа антени приймача сигналу, м²;

R_n – відстань від передавача перешкоди до приймача сигналу, м;

R_c – відстань від передавача до приймача сигналу, м;

x_{nn} , y_{nn} і x_{np} , y_{np} – координати передавача перешкоди та приймача сигналу, м;

$R(\cdot)$ – відстань між двома точками, м.

Підставляючи (3) та (4) в (2), після скорочення A_e і 4π матимемо такий вираз для оцінки ефективності РП одного приймача (в умовах відсутності похибок визначення координат):

$$E_1 = 1 \left[\frac{P_{nn} G_{nn}}{P_{nc} G_{nc} K_n} - \frac{R^2(x_{nn}, y_{nn}, x_{np}, y_{np})}{R^2(x_{nc}, y_{nc}, x_{np}, y_{np})} \right]. \quad (5)$$

У загальному випадку, коли задано декілька (n) приймачів, ефективність РП одержується усередненням значень, отриманих згідно з (5):

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i. \quad (6)$$

Аналіз виразів (2)–(6) показує, що в умовах невизначеності координат передавача сигналу значення E , E_1 та P_c не можуть бути розраховані безпосередньо, оскільки координати передавача (x_{nc}, y_{nc}) та відстань від нього до приймача

$R_c = R(x_{nc}, y_{nc}, x_{np}, y_{np})$ невідомі. Таким чином, у задачі, що розглядається, і відстань R_c , і потужність P_c є випадковими величинами [7].

Закон розподілу відстані $R_c = f_R(R_c)$ з урахуванням початкової умови $\sigma_{nc_x} = \sigma_{nc_y} = \sigma_{nc}$ можна також вважати нормальним з математичним сподіванням $m_{R_c} = R(m_{x_{nc}}, m_{y_{nc}}, x_{np}, y_{np})$ та середньоквадратичним відхиленням $\sigma_{R_c} = \sigma_{nc}$, тобто

$$f_R(R_c) = \frac{1}{\sigma_{nc} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(R_c - m_{R_c})^2}{2\sigma_{nc}^2} \right\}. \quad (7)$$

Оскільки потужність P_c у задачі, що розглядається, є випадковою величиною, вираз для обчислення E_1 (2) має враховувати закон розподілу цієї потужності $f(P_c)$ та може бути описаний у такий спосіб [7]

$$E_1 = P \left\langle \frac{P_n}{K_n} > P_c \right\rangle = \int_0^{P_n K_n^{-1}} f(P_c) dP_c, \quad (8)$$

де $P\langle \cdot \rangle$ – ймовірність виконання умови, зазначеної в дужках.

Вираз (8) є ймовірнісною формою енергетичної умови подавлення (1).

Закон розподілу потужності сигналу на вході приймача $f(P_c)$ в умовах похибок визначення координат передавача можна отримати за такою формулою [7]

$$f(P_c) = f_R(R_c(P_c)) R'_c(P_c), \quad (9)$$

де $R_c(P_c)$ – функція, обернена до $P_c(R_c)$ (3):

$$R_c(P_c) = \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} A_e}{4\pi P_c}}. \quad (10)$$

Модуль похідної оберненої функції $|R'_c(P_c)|$ визначається так:

$$|R'_c(P_c)| = \left| \left(\sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} A_e}{4\pi P_c}} \right)' \right| = P_c^{-\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{P_{nc} G_{nc} A_e}}{4\sqrt{\pi}}. \quad (11)$$

Підставляючи (7), (10), (11) в (9), отримаємо вираз для закону розподілу потужності сигналу на вході приймача в умовах похибок визначення координат передавача:

$$f(P_c) = P_c^{-\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{P_{nc} G_{nc} A_e}}{4\sqrt{2\pi}\sigma_{nc}} \exp \left\{ -\frac{\left(\sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} A_e}{4\pi P_c}} - m_{R_c} \right)^2}{2\sigma_{nc}^2} \right\}. \quad (12)$$

Достовірність отриманого закону розподілу (12) забезпечується оберненістю до P_c його одиниці вимірювання (Вт^{-1}) та виконанням умови щодо площі під функцією $f(P_c)$ [7]:

$$\int_0^{\infty} f(P_c) dP_c = 1. \quad (13)$$

Підставляючи (12) у (8) та виконуючи відповідне інтегрування, матимемо

$$E_1 = \Phi \left(\frac{1}{\sigma_{nc}} \left(m_{R_c} - \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} K_n}{P_{nn} G_{nn}}} \cdot R_n \right) \right), \quad (14)$$

де $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – нормальна функція розподілу [7].

Підставляючи (14) у (6) та використовуючи функцію $R(\cdot)$, отримаємо остаточний розв'язок задачі оцінювання ефективності РП в умовах похибок визначення координат передавача сигналу:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi \left(\frac{1}{\sigma_{nc}} \left(R(m_{x_{nc}}, m_{y_{nc}}, x_{np_i}, y_{np_i}) - \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} K_n}{P_{nn} G_{nn}}} \cdot R(x_{nn}, y_{nn}, x_{np_i}, y_{np_i}) \right) \right). \quad (15)$$

Аналіз виразів (14) та (15) показує, що фізично значення E_1 (14) відповідає ймовірності подавлення приймача, а E (15) – усередненій ймовірності подавлення усіх n приймачів. Порівняння виразів (5) і (14) показує, що набір вихідних даних для розрахунків оцінки ефективності РП в умовах похибок дещо змінився: замість координат передавача x_{nc} , y_{nc} необхідно використовувати їх математичні сподівання $m_{x_{nc}}$, $m_{y_{nc}}$ та середньоквадратичне відхилення σ_{nc} .

Виконаємо перевірку достовірності отриманого розв'язку шляхом його аналізу для граничних умов. Коли похибка визначення координат передавача наближається до нуля, значення ефективності РП (14) залежить від співвідношення складових цього виразу:

$$E_1 \left(\sigma_{nc} \rightarrow 0, m_{R_c} > \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} K_n}{P_{nn} G_{nn}}} R_n \right) = \Phi(\infty) = 1, \quad (16)$$

$$E_1 \left(\sigma_{nc} \rightarrow 0, m_{R_c} < \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} K_n}{P_{nn} G_{nn}}} R_n \right) = \Phi(-\infty) = 0. \quad (17)$$

Обидва вирази (16) та (17) можна комплексувати через одиничну функцію:

$$E_1(\sigma_{nc} \rightarrow 0) = 1 \left[m_{R_c} - \sqrt{\frac{P_{nc} G_{nc} K_n}{P_{nn} G_{nn}}} R_n \right]. \quad (18)$$

Якщо підвести в квадрат обидва доданки в (18), що не впливає на точку перегину одиничної функції (якщо $a > b$, то $a^2 > b^2$), отримаємо

$$E_1(\sigma_{nc} \rightarrow 0) = 1 \left[\frac{P_{nn} G_{nn}}{P_{nc} G_{nc} K_n} - \frac{R_n^2}{m_{R_c}^2} \right]. \quad (19)$$

Аналіз виразу (19) показує, що він відповідає виразу (5). Тобто отриманий розв'язок задачі оцінювання ефективності РП в умовах похибок визначення координат передавача в граничному випадку ($\sigma_{nc} \rightarrow 0$) повністю збігається з аналогічним для відомих координат передавача.

Розглянемо приклад застосування отриманого розв'язку задачі оцінювання ефективності РП в умовах похибок визначення координат передавача. При розрахунках використаємо такі вихідні дані: $P_{nc} = 50 \text{ Вт}$; $G_{nc} = 3$; $G_{nn} = 10$; $A_e = 1 \text{ м}^2$; $K_n = 2$; $\sigma_{nc} = 3 \text{ км}$; $x_{nn} = 10 \text{ км}$; $y_{nn} = 10 \text{ км}$; $m_{x_{nc}} = 40 \text{ км}$; $m_{y_{nc}} = 30 \text{ км}$; $x_{np} = 30 \text{ км}$; $y_{np} = 35 \text{ км}$. Для вказаних вихідних даних закон розподілу потужності сигналу на вході приймача (12) матиме вигляд, зображений на рис. 1.

$f(P_c) \uparrow$

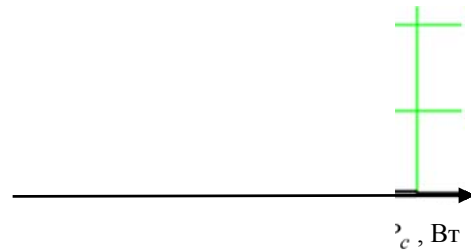


Рис. 1. Закон розподілу потужності сигналу на вході приймача

Аналіз рис. 1 показує, що отриманий закон розподілу є несиметричним. Для використаних вихідних максимум $f(P_c)$ досягається при значенні P_c близько $0,7 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$, хоча математичне сподівання P_c є дещо більшим ($1,13 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$) внаслідок несиметричності розподілу.

Для тих самих вихідних даних розраховано залежність ефективності РП (14) від потужності передавача перешкоди (рис. 2). Для можливості порівняння на рис. 2 додатково пунктиром наведено результати аналогічних розрахунків для відсутності похибок визначення координат передавача (5).

Аналіз рис. 2 показує, що залежність $E_1(P_{nn})$ для $\sigma_{nc} = 3 \text{ км}$ має нелінійний, монотонний, зростаючий характер. До рівня $P_{nn} = 90 \text{ Вт}$ значення E_1 дорівнює нулю, тобто є так звана ділянка “нечутливості”. Далі функція $E_1(P_{nn})$ спочатку відносно стрімко зростає, а потім поступово переходить в область

“насичення”, де збільшення потужності передавача перешкод приводить лише до невеликого зростання E_1 . Таким чином, залежність $E_1(P_{mn})$ відповідає аналогічній, яку отримано в [5] для умов невизначеності координат. Обидва графіки на рис. 2 пересікаються на рівні 0,5, а їх порівняння показує, що врахування похибок визначення координат передавача сигналу дозволяє усунути похибку оцінювання ефективності РП, яка становить до 50% та може коливатись як у бік збільшення, так і зменшення. Наприклад, для $P_{mn} = 230$ Вт $E_1 = 0,48$, хоча без урахування похибок визначення координат $E_1 = 0$ (рис. 2).



Рис. 2. Графік залежності ефективності РП від потужності передавача перешкод

Висновки

Таким чином, у результаті проведених досліджень виведено закон розподілу (12) потужності сигналу на вході приймача в умовах похибок визначення координат передавача сигналу. На основі цього закону та обґрунтування ймовірнісної форми енергетичної умови подавлення (8) одержано розв’язок задачі оцінювання ефективності РП у зазначених умовах (14), (15).

Оценивание эффективности радиоподавления в условиях погрешностей определения координат передатчика сигнала

Ю.В. Журавский

В статье выведен закон распределения мощности сигнала на входе приемника в условиях погрешностей определения координат передатчика сигнала. На основе этого закона и обоснования вероятностной формы энергетического условия подавления получено решение задачи оценивания эффективности радиоподавления. Физически оценка эффективности радиоподавления в таких условиях равна вероятности подавления приемника (приемников). Достоверность полученных результатов обеспечивается их совпадением с известными формулами в граничных случаях. Результаты исследований позволяют уменьшать погрешность оценивания эффективности радиоподавления.

Ключевые слова: радиоподавление, эффективность, погрешность, координаты, передатчик.

Evaluation of radiojamming efficiency in the conditions of coordinates determination errors of signal transmitter

Y. Zhuravskyi

In the article the law of signal power distributing is derived on the entrance of receiver in the conditions of coordinates determination errors of signal transmitter. On the basis of this law and ground of probabilistic form of jamming power condition the decision of task of evaluation of radiojamming efficiency is got. Physically the estimation of radiojamming efficiency in such terms equals probability of receiver (receivers) suppression. Authenticity of the got results is provided by their accordance with known formulas in scope cases. The results of researches allow diminishing the error of radiojamming efficiency evaluation.

Keywords: radiojamming, efficiency, errors, coordinates, transmitter.

Фізично оцінка ефективності РП у таких умовах дорівнює ймовірності подавлення приймача (приймачів). Достовірність отриманих результатів забезпечується їх збіжністю з відомими формулами в граничних випадках. Результати досліджень опрацьовано до рівня, який дозволяє застосовувати їх на практиці, що надає можливість зменшувати похибку оцінювання ефективності РП до 50%.

Перспективи подальших досліджень у даному напрямку полягають у розв’язанні задач оцінювання ефективності РП в умовах похибок визначення інших координат і параметрів.

Список літератури

1. Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2007. – 356 с.
2. Радзиевский В.Г. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / В.Г. Радзиевский, А.А. Агафонов. – М.: Радиотехника, 2006. – 424 с.
3. Перунов Ю.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Ю.М. Перунов, К.И. Фомичев, Л.М. Юдин. – М.: Радиотехника, 2003. – 419 с.
4. Куприянов А.И. Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / А. И. Куприянов, А. В. Сахаров. – М.: Вузовская книга, 2003. – 442 с.
5. Журавський Ю. В. Оцінювання ефективності радіоподавлення в умовах невизначеності координат / Ю.В. Журавський // Системи обробки інформації : зб. наук. праць. – Х.: ХУПС, 2009. – № 76 (2). – С. 45–47.
6. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1968. – 516 с.

Рецензент: д.т.н., проф. В.П. Манойлов, Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир.