

УДК 629.7:621.396

Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Ю.В. Трофименко, Д.В. Карлов, А.М. Остапова

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ЕНЕРГЕТИЧНЕ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ В УМОВАХ РАДІОПЕРЕШКОД

Розглядаються основи використання енергетичного відношення правдоподібності для виявлення радіосигналів при цифровій обробці інформації одноканальним простим радіолокаційним приймачем на частоті зондуючого сигналу в умовах впливу радіоперешкод. Аналізується чутливість критерію до виявлення слабких за енергетикою радіосигналів на фоні активних і пасивних радіоперешкод.

Ключові слова: енергетичний критерій виявлення радіолокаційних сигналів, радіолокаційна станція (РЛС), енергетичне виявлення цілей, розпізнавання впливу активних маскуючих перешкод, оптимальне енергетичне виявлення, компенсація радіоперешкод

Введение

Загальна постановка проблеми, аналіз останніх досягнень та публікацій. В традиційній радіолокації завдання автоматичного розпізнавання впливу активних і пасивних маскуючих перешкод не вирішувалось. Вирішувалось завдання оцінки впливу активних перешкод на дальність дії радіолокатора. Рівняння протирадіолокації має вигляд:

$$r_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{ср}} T_{\text{огл}} G A \sigma}{(4\pi)^2 \gamma_{\Sigma} (N_0 + W_{\text{аш}})}} F(\theta, \varepsilon),$$

де $\gamma_{\Sigma} = W_{\min}/N_0$ – сумарний коефіцієнт розрізнення, $W_{\min} = \frac{q^2}{2} N_0$ – мінімальна енергія сигналу для забезпечення заданих показників якості виявлення сигналу при класичному способі виявлення; q – відношення сигнал/шум традиційної теорії радіолокації, при якому забезпечуються задані показники якості виявлення радіосигналу: наприклад, умовна ймовірність правильного виявлення $P = 0,5$; $F = 10^{-4}$ для релівської моделі амплітудних флуктуацій; N_0 – спектральна щільність потужності внутрішнього шуму; $F(\theta, \varepsilon)$ – нормована діаграма спрямованості антени по куту місця і азимуту; G – еквівалентний коефіцієнт підсилення антени; $T_{\text{огл}}$ – період огляду простору; A – ефективна площа антени; σ – ефективна відбиваюча поверхня цілі; $W_{\text{аш}}$ – абсолютний енергетичний рівень активної перешкоди.

В [1] розглянутий енергетичний метод виявлення радіосигналів, що співвимірні за енергетикою з внутрішніми шумами приймача. При цьому усереднений рівень внутрішніх шумів є мірою для виявлення адитивної суміші сигнал+шум. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку варіантів автоматичного розпізнавання впливу маскуючих перешкод і дослідження стійкості алгоритмів виявлення радіосигналів на фоні маскуючих перешкод.

Мета статті – розробка варіанту математичного апарату для прийняття рішення про виявлення впливу активних і пасивних маскуючих перешкод та виявлення цілі цифровими РЛС на фоні активних і пасивних маскуючих перешкод при використанні енергетичного критерію [1, 2] і плинної статистичної обробки вибірки оцифрованої суміші сигналу, шуму і перешкоди.

Постановка задачі та виклад матеріалів дослідження

На приймач РЛС впливають наступні класи радіоперешкод:

активна маскуюча на інтервалі $\{T_{\text{ан}}, T_{\text{ак}}\}$;

пасивна маскуюча на інтервалі $\{T_{\text{пн}}, T_{\text{пк}}\}$;

суміш активної і пасивної маскуючих перешкод.

Відрізняльні ознаки активної маскуючої перешкоди: існує на інтервалі $\{T_{\text{ан}}, T_{\text{ак}}\}$ і характеризується абсолютним рівнем енергії $W_{\text{аш}}$;

Відрізняльні ознаки пасивної маскуючої перешкоди: існує на інтервалі $\{T_{\text{пн}}, T_{\text{пк}}\}$ і має енергетичний рівень $W_{\text{пп}}$.

Необхідно знайти алгоритм автоматичного розпізнавання даних класів радіоперешкод.

Завдання автоматичного розпізнавання впливу маскуючих активних і пасивних перешкод можливо вирішити шляхом синтезу багатоальтернативних статистичних оптимальних за критерієм мінімуму середнього ризику алгоритмів розпізнавання образів, які ґрунтуються на визначенні еталонних описів образів, що розпізнаються, у вигляді щільності ймовірностей $w(s)$ [3]:

$$w_j(s) = \prod_{j=1}^{\Xi} \left\{ \sum_{r=1}^{R_j} p_{ijr} w_{ijr}(s_j, s'_{ijr}, s''_{ijr}) + \sum_{d=1}^{D_j} p_{ijd} \delta(s_j - s_{ijd}) \right\},$$

де Ξ – евклідовий простір кількісних ознак S_j , що вимірюються або розраховуються в приймачі і характеризують стани процесів. Кожен співмножник містить R_{ij} щільностей ймовірностей $w(s_j, s'_{ij}, s''_{ij})$ еталонного розподілу ознаки S_j на кожному еталонному інтервалі (s'_{ijr}, s''_{ijr}) можливих значень S_j і D_{ij} δ функцій Дірака $\delta(s'_j - s''_{jld})$, що відповідають точковим еталонним значенням S_j для кожного з образів, що розпізнаються. При цьому p_{ijr}, p_{ijd} – апріорні умовні ймовірності спостереження r -того інтервалу, $r \in \{1, 2, \dots, R_{ij}\}$, або d -го значення, $d \in \{1, 2, \dots, D_{ij}\}$, при спостереженні образу U_i у метриці ознаки S_j . Для ймовірностей p_{ijr}, p_{ijd} потрібне дотримання умов нормування.

$$p_{ij} = \sum_{r=1}^{R_i} p_{ijr} + \sum_{d=1}^{D_i} p_{ijd} = 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, \Omega\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, \Xi\},$$

де Ω – кількість образів, що розпізнаються.

Відомий процес дозволяє вибрати дискретно-аналогове нерандомізоване оптимальне за критерієм мінімуму середнього ризику правило δ , що розділяє вибірковий простір X оцінок параметрів на Ω непересічних областей $x_i, i \in \{1, 2, \dots, \Omega\}, \bigcup_{i=1}^{\Omega} x_i = X$ для образів, які задані у метриках кількісних ознак інтервалами та дискретними значеннями обмірюваних параметрів процесів.

Завдання автоматичного розпізнавання впливу активних і пасивних маскуючих перешкод на приймач РЛС на етапі енергетичного виявлення радіосигналів (на етапі первинної обробки) [2] можливо вирішити шляхом перевірки статистичних гіпотез за критерієм мінімуму середнього ризику з використанням енергетичного відношення правдоподібності

$$\frac{W_{\text{ш}} + W_{\text{с}}}{W_{\text{ш}}} \frac{0 - \tau_i}{0 - \tau_{i-2}} > L_0.$$

Алгоритм виявлення впливу активних перешкод включає множину визначених відношень плинних оцінок енергії суміші радіосигналу і шуму на інтервалі аналізу рівному тривалості сигналу, до значень усереднених за декілька попередніх інтервалів аналізу енергії шуму протягом періоду слідування радіосигналів в умовах апріорної відсутності активних маскуючих перешкод і порівнянні енергетичного відношення правдоподібності в кожному інтервалі аналізу з порогом прийняття рішення L_0 , що визначається за критерієм Неймана-Пірсона із виразу умовної ймовірності хибних тривоги.

Поріг енергетичного виявлення активної маскуючої перешкоди L_0 визначається із рівняння:

$$P \left\{ \sum_{i=1}^n (\xi_i^2 \Delta t) > L_0 \right\} = F;$$

де ξ_i^2 – квадрат амплітуди шумової гаусівської вибірки; Δt – інтервал дискретизації вхідної реалізації випадкового процесу $y(t)$.

З урахуванням реального рівня внутрішніх шумів $P \left\{ \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\xi_i^2 \Delta t) > \frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t} \right\} = F;$

Для моделі χ^2 -розподілу рівняння має вигляд:

$$1 - F_{\chi^2} \left(\frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t}, N \right) = F; \quad x = \frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t},$$

x – значення табульованої інтегральної функції χ^2 -розподілу квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок:

Звідки поріг виявлення активної маскуючої перешкоди з заданою ймовірністю хибних тривоги F :

$$L_0 = x \sigma^2 \Delta t,$$

де σ^2 – дисперсія випадкового процесу $y(t)$, що визначається на інтервалі випадкового процесу, де відсутній радіосигнал і активна шумова перешкода;

$F_{\chi^2} \left(\frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t}, N \right)$ – табульована функція χ^2 -розподілу квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок n ; $n = N - 1$.

Прийняття рішення про вплив активних перешкод протягом періоду здійснюється за критерієм « m із m » при апроксимації процесу прийняття рішення марківським однорідним ланцюгом.

Розпізнавання впливу маскуючих шумових перешкод можливе за рахунок запам'ятовування значення рівня власних шумів попередніх вимірювань $W_{\text{ш}}$, що видно із аналізу енергетичного відношення правдоподібності:

$$\frac{W_{\text{ш}} + W_{\text{аш}} + W_{\text{с}}}{W_{\text{ш}}} \frac{0 - \tau_i}{0 - \tau_{i-2}} > L_0,$$

де $W_{\text{аш}}$ – абсолютний енергетичний рівень активної перешкоди.

При відсутності сигналу енергетичне відношення правдоподібності покаже відносний енергетичний рівень активної перешкоди. Відрізняльною ознакою класу активних перешкод є виконання критерію « m із m » перевищень порогу виявлення протягом часу впливу активних перешкод.

Значний практичний інтерес викликає процес виявлення корисних радіосигналів на фоні активних маскуючих перешкод при використанні енергетичного методу виявлення.

Чутливість критерію до виявлення сигналу на фоні активних маскуючих перешкод визначимо із такого енергетичного відношення правдоподібності:

$$\frac{W_{\text{ш}} + W_{\text{аш}} + W_{\text{с}}}{0 - \tau_i} > L_{0\text{ап}},$$

де $L_{0\text{ап}}$ – поріг прийняття рішення про виявлення сигналу від цілі на фоні внутрішніх шумів і активної перешкоди, що знаходиться із умовної ймовірності хибної тривоги з урахуванням впливу активної маскуючої перешкоди.

Прийняття рішення про виявлення сумарної енергії радіосигналу, внутрішнього шуму і активної шумової перешкоди здійснюється після порівняння значення енергетичного відношення правдоподібності в кожному інтервалі аналізу при виявленому впливі активних перешкод при довільному законі розподілу випадкових величин з порогом прийняття рішення.

При цьому величина сумарної дисперсії шуму і активної гаусівської перешкоди $\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ і відрізняється від дисперсії внутрішнього шуму. Поріг прийняття рішення про виявлення сигналу від цілі при впливі активних перешкод також відрізняється від випадку їх відсутності. Поріг виявлення $L_{0\text{ц}}$ визначається за методикою аналогічною при виявленні сумарної енергії внутрішнього шуму і активної шумової перешкоди.

Корисний результат, який може бути отриманий при реалізації запропонованої моделі, полягає у тому, що на основі здійснення вимірювань енергетичного відношення правдоподібності сигналу+шуму+перешкоди /шуму+перешкоди на інтервалі існування корисного сигналу при використанні критерію Неймана-Пірсона, виявляються радіосигнали з заданими якісними показниками, визначається інтервал впливу активної маскуючої перешкоди та її характеристики.

Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою в 2 рази перевершуючою рівень власних шумів подана на рис. 1 без урахування флуктуацій усередненого рівня енергії суми власних шумів і маскуючої перешкоди.

Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою в 2 рази перевершуючою рівень власних шумів, пасивної перешкоди за енергетикою рівною енергетиці сигналу від цілі і слабого сигналу меншого рівня шуму подана на рис. 2. На рис. 2, а подані відносні рівні енергій активної перешкоди, пасивної перешкоди і корисного сигналу на фоні енергії внутрішніх шумів. Із рис. 2, б слідує, що енергетичний підхід до аналізу радіосигналів дозволяє розпізнати складну перешкодову обстановку.

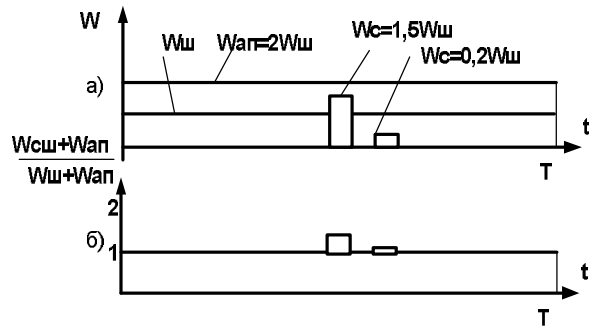


Рис. 1. Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою в 2 рази перевершуючою рівень власних шумів

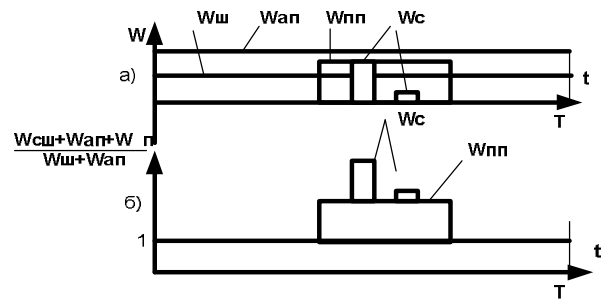


Рис. 2 Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою в 2 рази перевершуючою рівень власних шумів, пасивної перешкоди за енергетикою рівною енергетиці сигналу від цілі і слабого сигналу меншого рівня шуму

Сутність розпізнавання впливу суміші активних і пасивних перешкод полягає у послідовному виявленні активної перешкоди, потім пасивної перешкоди і корисного радіосигналу, що відбитий від цілі.

Результати попереднього дослідження стійкості енергетичного критерію виявлення радіосигналів при впливі активних шумових перешкод при відсутності помилок вимірювання енергії і при 10% точності від енергетичного відношення активна перешкода/внутрішній шум приймача подані на рис. 3, де

$$\frac{W_{\text{сш}}}{W_{\text{аш}}} = \frac{W_{\text{ш}} + W_{\text{аш}} + W_{\text{с}}}{0 - \tau_i} - \text{енергетичне відношення}$$

правдоподібності на і-тому інтервалі аналізу, $W_{\text{ш}}$, $W_{\text{аш}}$, $W_{\text{с}}$ – абсолютні рівні енергій відповідно внутрішнього шуму, активної перешкоди і сигналу. $\Delta W_{\text{ш}}$ – помилка вимірювання абсолютного значення рівня внутрішнього шуму, $W_{\text{аш}}/W_{\text{ш}}$ – відношення енергій активної перешкоди до енергії внутрішнього шуму.

Із рис.3 видно, що навіть при нереально високих рівнях маскуючих перешкод, енергетичний критерій є дієздатним і може бути використаний для розпізнавання на етапі первинної обробки інформації.

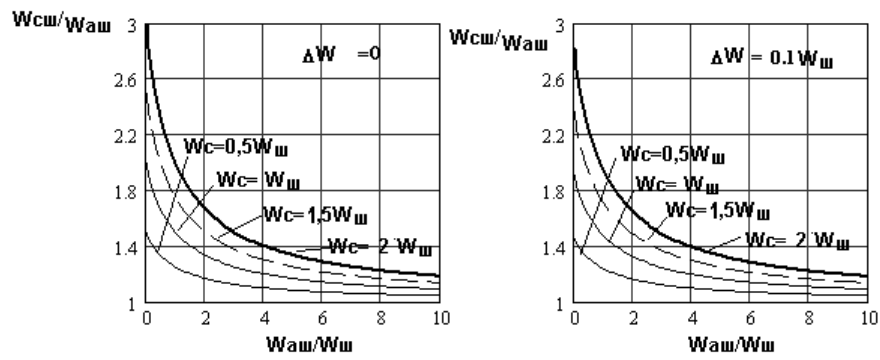


Рис. 3. Результати дослідження стійкості енергетичного критерію при впливі активних шумових перешкод

Енергетичне відношення правдоподібності для виявлення радіосигналу на фоні суміші активної і пасивної перешкод має вигляд:

$$\frac{W_{ш} + W_{аш} + W_{пп} + W_c}{W_{ш} + W_{аш} + W_{пп}} > L_0,$$

де $W_{пп}$ – значення енергії пасивної перешкоди.

Процес одноканального часового виявлення радіосигналів на фоні активних і пасивних перешкод подано на рис. 4.

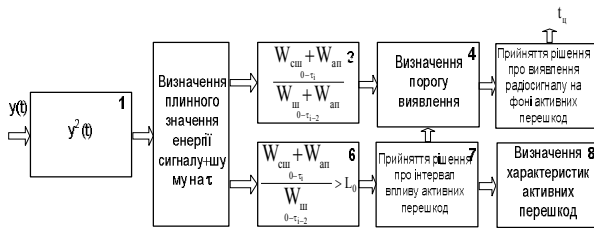


Рис. 4. Процес одноканального часового виявлення радіосигналів на фоні активних маскуючих перешкод

Положення початку впливу активної маскуючої перешкоди квазіоптимальне в енергетичному відношенні шум+активна перешкода/шум визначається виразом початку цього інтервалу аналізу

$$t_{ц} = t_k - \frac{(W_1 - W_{ш})}{W} \tau,$$

де $W = (W_1 - W_{ш}) + (W_2 - W_{ш})$ - енергія активної маскуючої перешкоди при оптимальному енергетичному виявленні; $(W_1 - W_{ш})$, $(W_2 - W_{ш})$ - енергії активної маскуючої перешкоди у першому і другому інтервалах аналізу, що перекривають інтервал початку впливу активної маскуючої перешкоди; t_k - положення центру двох сусідніх інтервалів аналізу, що перевищили поріг виявлення; W_i - значення енергії суміші активної маскуючої перешкоди і шуму в i -му інтервалі аналізу.

Заключне прийняття рішення про оптимальне енергетичне виявлення енергії суміші активної маскуючої перешкоди і шуму здійснюється шляхом

пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності при послідовній зміні інтервалу аналізу на крок в діапазоні $\pm \Delta t$ пропорційному діапазону можливих флуктуацій енергії активної перешкоди і внутрішнього шуму приймача:

$$t_{ц} = (t_k - \frac{(W_1 - W_{ш})}{W} \tau) \pm \Delta t.$$

Виявлення інтервалу початку сумарної енергії сигналу, активної маскуючої перешкоди і внутрішнього шуму здійснюється за методикою аналогічною виявленню суми енергій активної маскуючої перешкоди і внутрішнього шуму приймача. При цьому у виразі для $t_{ц}$ значення W_i - значення енергії суміші сигналу, активної маскуючої перешкоди та шуму в i -му інтервалі аналізу; $W = (W_1 - W_{ш\Sigma}) + (W_2 - W_{ш\Sigma})$ - значення енергії сигналу при оптимальному енергетичному виявленні; $(W_1 - W_{ш\Sigma})$, $(W_2 - W_{ш\Sigma})$ - енергії сигналу у першому і другому інтервалах аналізу, що перекривають інтервал положення радіосигналу; $W_{ш\Sigma}$ - сумарна енергія активної маскуючої перешкоди і внутрішнього шуму за попередній (1-2) інтервал аналізу.

Можливий варіант компенсації радіоперешкод при енергетичному виявленні

Сутність компенсації перешкод при використанні енергетичного критерію полягає у видаленні відомого радіосигналу із суміші сигнал+шум+перешкода з подальшим відніманням отриманої різниці від реалізації суміші сигнал+шум+перешкода. Показником якості компенсації перешкод є абсолютний рівень енергії радіосигналу (рис. 5).

Значний інтерес викликає процес вимірювання-компенсації перешкод в умовах невідомої доплерівської частоти і початкової фази (рис.6).

В умовах апріорної невизначеності параметрів радіосигналів здійснюється послідовне віднімання очікуваних радіосигналів із змінними параметрами на множині їх можливих значень при енергетичному контролі вихідного сигналу.

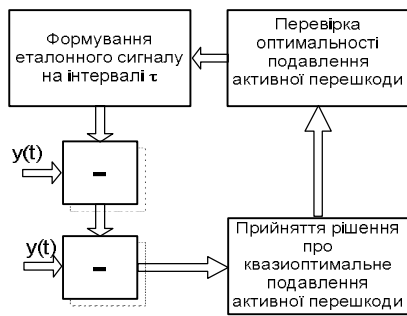


Рис. 5. Компенсатор перешкод на інтервалі існування відомого радіосигналу

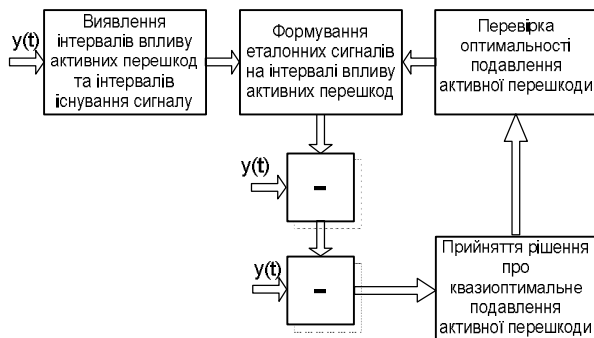


Рис. 6. Компенсатор перешкод – вимірювач параметрів на інтервалі існування радіосигналу

Висновки та напрямки подальших досліджень

При невеликих рівнях маскуючих перешкод в найпростіших радіолокаторах важко виявити їх вплив. Використання наведеного варіанту енергетичного критерію оптимального виявлення радіосигналу від цілі цифровими РЛС відкриває перспективу побудови нових низькопотенційних радіолокаторів з автоматичним розпізнаванням впливу радіоперешкод, підвищення їх перешкодозахищеності та бойових можливостей. Даний метод виявлення можливо узагальнити на всі радіотехнічні системи, де є

приймачі радіосигналів. При використанні тривалих сигналів (наприклад, у системах зв'язку та управління) доцільно виявляти інтервал початку радіосигналу, а далі сигнал посилювати та дешифрувати.

Необхідне подальше дослідження принципів побудови нової енергетичної теорії виявлення - оцінювання параметрів радіосигналів за енергетикою співвимірних з внутрішніми шумами з безпосереднім використанням енергетичного відношення правдоподібності як шляхом аналого-цифрового моделювання, так і проведенням натурних досліджень паралельно з відомими алгоритмами виявлення і оцінювання параметрів радіосигналів.

Матеріали статті корисні для широкого кола спеціалістів в галузі радіолокації, що займаються фундаментальними теоретичними дослідженнями та практичними розробками радіотехнічних систем.

Список літератури

1. Певцов Г.В. Метод енергетичного виявлення радіосигналів / Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Д.В. Карлов, Ю.В. Трофименко // Системи управління, навігації та зв'язку. – № 4 16). – К.: ЦНДІ НІУ, 2010. – С. 72-76.
2. Пат. 57216. Україна, МПК G01S 7/02. / Процес енергетичного виявлення радіосигналів / Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, та ін.; – №201012202; заявл. 15.10.2010; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 3.
3. Пат. 32093 Україна, / Процес синтезу гібридних алгоритмів базатоальтернативного розпізнавання образів на основі перевірки складних статистичних гіпотез за критерієм максимуму апостеріорної ймовірності / Г.В. Певцов, М.О.Олійник, Е.Г.Фастовський (Україна) заявл. 12.05.08.

Надійшла до редколегії 23.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ

Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Ю.В. Трофименко, Д.В. Карлов, А.М. Остапова

Рассматриваются основы использования энергетического отношения правдоподобия для обнаружения радиосигналов при цифровой обработке информации одноканальным простым радиолокационным приемником на частоте зондирующего сигнала в условиях влияния радиопомех. Анализируется чувствительность критерия к обнаружению слабых по энергетике радиосигналов на фоне активных и пассивных радиопомех.

Ключевые слова: энергетический критерий выявления радиолокационных сигналов, радиолокационная станция (РЛС), энергетическое выявление целей, распознавание влияния активных маскирующих препятствий, оптимальное энергетическое выявление, компенсация радиопомех.

POWER DISCOVERY OF RADIOSIGNALS IN THE CONDITIONS OF HINDRANCES

G.V. Pevtsov, A.Ya. Yacucenko, D.V. Karlov, Yu.V. Trofimenko, A.M. Ostapova

Bases of the use of power relation of verisimilitude are examined for finding out radio signals at digital treatment of information by a simple radio-location receiver on frequency of sounding signal in the conditions of influence of radio interferences. The sensitiveness of criterion is analysed to the exposure of weak after energy radiosignals on a background active and passive hindrances.

Keywords: power criterion of exposure of radio-location signals, radar, power exposure of aims, recognition of influence of active masking obstacles, optimum power exposure, indemnification of radio interferences.