

УДК 629.7:621.396

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

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ–ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

Викладені основні результати фундаментальних досліджень в галузі теорії радіолокації і їх практичного застосування в радіотехнічних системах. Новизна досліджень полягає у тому, що в рамках закону збереження енергії і байєсівської статистичної теорії прийняття рішень розглядається новий підхід до процесу виявлення радіолокаційних сигналів від цілей за енергетичним критерієм. Розглядається сутність енергетичної теорії виявлення оцінювання для радіолокаційних, радіонавігаційних систем, систем управління та зв'язку. Формулюється умова оптимального енергетичного виявлення радіосигналів на фоні власних шумів приймача. Аналізується чутливість критерію до виявлення слабких за енергетикою радіосигналів на фоні власних шумів приймача, активних і пасивних перешкод, оцінюється виграш в дальності виявлення при енергетичному і традиційному критеріях виявлення. Викладаються основні принципи побудови теорії оцінювання параметрів радіосигналів з безпосереднім використанням енергетичного відношення правдоподібності.

**Ключові слова:** енергетичний критерій виявлення радіолокаційних сигналів, енергетичне відношення правдоподібності, радіолокаційна станція (РЛС), виявлення цілей, оптимальне енергетичне виявлення цілей, активні і пасивні перешкоди, принципи побудови теорії оцінювання параметрів радіосигналів.

### Постановка проблеми. Аналіз досліджень і публікацій

В теорії радіолокації для прийняття рішення про виявлення радіосигналу використовується критерій мінімуму середнього ризику [1]

$$\begin{aligned} \bar{r} &= r_{np}P(A_1)(1-D) + r_{xm}P(A_0)F, \\ \bar{r} &= r_{np}P(A_1) + r_{np}P(A_1)(D-l \cdot F), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $l = \frac{r_{xm}P(A_0)}{r_{np}P(A_1)}$  – ваговий множник;  $r_{xm}, r_{np}$  – ризики

хибної тривоги і пропуску цілі;  $P(A_1)$  – ймовірність наявності цілі;  $P(A_0)$  – ймовірність відсутності цілі;  $D$  – умовна ймовірність правильного виявлення;  $F$  – умовна ймовірність хибної тривоги.

Мінімум вираз (1) має при

$$(D - l_0 \cdot F) = \int_{-\infty}^{\infty} p_{uu}(y) A^*(y) [l(y) - l_0] dy = \max, \quad (2)$$

де  $l(y) = \frac{p_{cu}(y)}{p_{uu}(y)}$  – відношення правдоподібності;

$l_0$  – поріг виявлення, що визначається критерієм Неймана-Пірсона.

Оптимальне правило виявлення сигналу:

$$A_{opt}^*(y) = \begin{cases} 1, & \text{при } l(y) > l_0; \\ 0, & \text{при } l(y) < l_0. \end{cases} \quad (3)$$

При оптимальному виявленні замість відношення правдоподібності  $l(y)$  можливо вираховувати будь-яку монотонно пов'язану з ним величину, що залежить від прийнятої реалізації  $y$ , і порівняти її зі своїм порогом.

З розвитком нових цифрових технологій, коли стала можливою статистична обробка радіолокаційної інформації на інтервалах часу, рівному періоду слідування зондуючих сигналів, виникає доцільність розробки алгоритмів виявлення відбитих від цілей радіолокаційних сигналів при плинній оцінці статистичних характеристик випадкового процесу.

### Формулювання мети статті

Мета статті – розробка методу енергетичного виявлення радіосигналів, який дозволить збільшити дальності виявлення цілей при даному потенціалі радіолокатора (або зменшити його потенціал для заданої дальності виявлення) при плинній статистичній обробці інформації.

### Виклад основного матеріалу

У відомій теорії радіолокації приймається рішення про виявлення радіосигналів на фоні внутрішнього шуму на основі амплітудної обробки інформації.

Ставиться завдання розробки методу енергетичного виявлення радіосигналів.

Байєсівський підхід при рішенні поставленої задачі доцільно впроваджувати за допомогою сукупності одночасно використовуваних умов виявлення і критерію прийняття рішення.

1. Недоліки традиційної теорії виявлення радіосигналів.

При виводі відношення правдоподібності математичні перетворення у відношенні правдоподібності – ділення чисельника на знаменник відповідає фізичному відокремленню сигналу від внутрішнього шуму, що в дійсності при обробці радіосигналів не виконується.

Показник відношення сигнал/шум  $q$  є гіпотетичною величиною, оскільки не вимірюється.

Вираз відношення правдоподібності включає величину енергії корисного сигналу, що не вимірюється і не використовується при прийнятті рішення про виявлення радіосигналу, а може трактуватися як систематична помилка, що обмежує можливість виявлення слабких сигналів.

Відношення правдоподібності не спирається на закон збереження енергії.

Відношення правдоподібності не використовується як критерій для прийняття рішення про виявлення оцінювання параметрів радіосигналів.

Використання відношення правдоподібності традиційної радіолокації принципово не дозволяє виявляти радіосигнали менші за енергетикою внутрішніх шумів.

2. Недоліки практичної реалізації теоретичних основ виявлення.

У радіоприймачах ведеться амплітудна обробка радіосигналів, не враховуючи того, що відношення правдоподібності утримує енергетичні показники.

При виявленні радіосигналів не враховується тривалість радіосигналів, що веде до зростання хибних тривог. Так, хибне виявлення навіть мілісекундних радіосигналів без урахування їх тривалості можливе будь-яким амплітудним викидом, що вимагає високих відношень сигнал/шум та високих порогів виявлення і веде до великих енергетичних затрат радіопередавальних пристроїв.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що при використанні критерію мінімуму середнього ризику замість відношення правдоподібності в (2), застосовується енергетичне відношення правдоподібності [2]  $L(y) = \frac{W_{cui}(y)}{W_{ui}(y)}$ ,

яке ґрунтується на законі збереження енергії і байєсівському підході максимального використання апіорних даних, що описують реальний процес виявлення. Визначення цього відношення полягає у знаходженні відношення плинних оцінок енергії суміші високочастотного сигналу і шуму з виходу антенної системи на інтервалі аналізу рівному тривалості сигналу до значень усереднених за декілька попередніх інтервалів аналізу енергій шуму протягом періоду слідування сигналів в умовах

апіорної невизначеності положення цілі або на довірчому інтервалі цілевказання. Прийняття рішення про виявлення радіосигналу здійснюється після порівняння максимального значення енергетичного відношення правдоподібності для довільного закону розподілу випадкових величин з порогом прийняття рішення  $L_0$ :

$$\max_{0-T} \frac{W_{cui}}{W_{ui}} > L_0,$$

де  $W_{cui} = \sum_{i=1}^K \{y_i - \bar{m}\}^2 \Delta t_i$  – оцінка дисперсії нероздільної

суми амплітуд сигналу+шуму на інтервалі рівному тривалості радіолокаційного сигналу, що еквівалентна оцінці її енергії;  $K$  – загальна кількість дискретних вимірів на інтервалі статистичного аналізу  $\tau$ ;

$W_{ui} = \frac{1}{M} [\sum_{i=0}^K \{n_i - \bar{m}\}^2 \Delta t_{i1} + \sum_{j=0}^K \{n_j - \bar{m}\}^2 \Delta t_{j1} + \dots]$  – оцінка

усередненого значення дисперсії амплітуд вхідної реалізації шуму на  $M$  інтервалах рівних тривалості радіолокаційного сигналу, що еквівалентна оцінці її усередненої енергії.

Поріг прийняття рішення про виявлення радіосигналу  $L_0$  визначається за критерієм Неймана-Пірсона з виразу умовної ймовірності хибної тривоги. Для моделі  $\chi^2$ -розподілу квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок умовна ймовірність хибних тривог має вигляд

$$F = \int_{L_0}^{\infty} (y)^2 \left[ \left( \frac{n}{2} \right) - 1 \right] e^{-\frac{y^2}{2}} dy.$$

Сутність запропонованого процесу енергетичного виявлення радіосигналів полягає у розбиванні періоду слідування радіосигналів  $T$  на інтервали часу рівні тривалості очікуваного сигналу  $\tau$  і вимірюванні енергії на кожному з них. Отримані значення енергій становлять джерело для визначення послідовності енергетичних відношень правдоподібності.

Енергетичне відношення правдоподібності початкових інтервалів аналізу визначається як відношення оцінки енергії плинного інтервалу аналізу до усередненої енергії шуму за попередній період слідування зондуючих сигналів, а наступні як відношення плинної енергії до усередненої енергії (і-2) інтервалу аналізу. При цьому процес енергетичного виявлення дозволяє зробити квазіоптимальний прийом за енергетикою на основі аналізу пропорції відношення сигнал+шум / шум у двох інтервалах аналізу і зрушити інтервал аналізу на відстань пропорційну цьому відношенню та отримати максимальне енергетичне відношення на інтервалі оцінювання.

Положення сигналу, що квазіоптимальне в енергетичному відношенні сигнал+шум/шум, визначається виразом початку цього інтервалу аналізу  $t_u = t_k - \frac{(W_1 - W_{u1})}{W} \tau$ , де  $W = (W_1 - W_{u1}) + (W_2 - W_{u2})$  – енергія сигналу при оптимальному енергетичному виявленні;  $(W_1 - W_{u1})$ ,  $(W_2 - W_{u2})$  – енергії сигналу у першому і другому інтервалах аналізу, що перекривають інтервал положення радіосигналу;  $t_k$  – положення центру двох сусідніх інтервалів аналізу, що перевищили поріг виявлення (при рівності енергій  $(W_1 - W_{u1}) = (W_2 - W_{u2})$ ) положення сигналу від цілі визначається як  $(t_k - \frac{\tau}{2})$ ;  $W_i$  – значення енергії суміші сигналу і шуму в  $i$ -му інтервалі аналізу.

Заключне прийняття рішення про оптимальне енергетичне виявлення здійснюється шляхом пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності при зміні інтервалу аналізу пропорційній діапазону можливих флуктуацій усереднених енергій внутрішнього шуму приймача  $\pm \Delta t$ :  $t_u = t_k - \frac{(W_1 - W_{u1})}{W} \tau \pm \Delta t$ .

Спосіб енергетичного виявлення реалізується за допомогою засобу виявлення високочастотних радіосигналів, що реалізує поданий на рис. 1 процес виявлення і утримує квадратор 1 вхідної реалізації, інтегратор 2 на інтервалі існування корисного сигналу або інший засіб визначення енергії сигналу, засіб 3 формування енергетичного відношення правдоподібності плинного значення енергії радіосигналу до усереднених значень енергії шуму за попередні інтервали аналізу і порівнянні його з порогом виявлення, засіб 6 прийняття попереднього рішення про енергетичне виявлення початку існування радіосигналу, засіб 5 прийняття рішення про квазіоптимальне енергетичне виявлення шляхом зрушення інтервалу часу між двома інтервалами аналізу на час, пропорційний енергії сигналу першого інтервалу аналізу до суми енергій першого та другого інтервалів аналізу і засіб 4 перевірки оптимальності енергетичного виявлення радіосигналу шляхом пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності при зміні на крок інтервалу аналізу в діапазоні, пропорційному можливим флуктуаціям усереднених енергій внутрішнього шуму приймача.

На рис. 1 наведена загальна схема процесу оптимального виявлення радіосигналів на основі перевірки статистичних гіпотез за критерієм мінімуму середнього ризику з використанням енергетичного відношення правдоподібності.

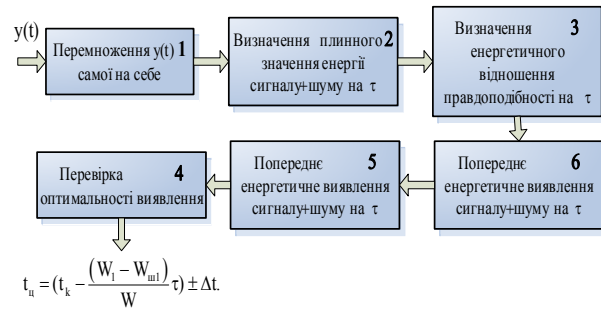


Рис. 1. Процес оптимального енергетичного виявлення радіосигналів

## Результати дослідження умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналів

На рис. 2 наведені графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналів  $D$  від амплітудного відношення сигнал/шум відомого способу виявлення  $q$  при збігу інтервалу аналізу з тривалістю радіосигналу (ідеальний випадок) для  $F=10^{-6}$ ;  $10^{-8}$ ;  $10^{-10}$  при тривалості сигналу рівному  $n$  вибірок. Графіки отримані за допомогою імітаційної аналого-цифрової моделі статистичним шляхом.

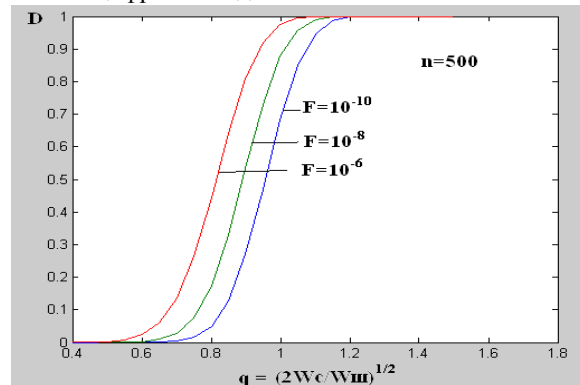


Рис. 2 Графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналів  $D$  від  $q$  при збігу інтервалу аналізу з тривалістю радіосигналу

На рис. 3 наведені графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналів  $D$  від  $q$  при збігу інтервалу аналізу з половиною інтервалу положення радіосигналу (найгірший випадок) для  $F=10^{-6}$ ;  $10^{-8}$ ;  $10^{-10}$ .

З аналізу кривих виявлення рис. 2 і 3 слідує, що при побудові засобів виявлення радіосигналів за енергетичним критерієм виявлення необхідно орієнтуватися на гірший варіант можливого розташування інтервалу аналізу відносно положення радіоімпульсу у часі. На рис. 4 наведений графік залежності порогу прийняття рішення про виявлення сигналу від цілі  $L_0$  за критерієм Неймана-Пірсона для моделі  $\chi^2$ -розподілу квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок в залежності від числа вибірок  $n$  для значень умовних ймовірностей хибних тривог  $F=10^{-4}$ ; ...;  $10^{-10}$ . Число вибірок  $n$  характеризує тривалість радіосигналу при незмінній несучій частоті.

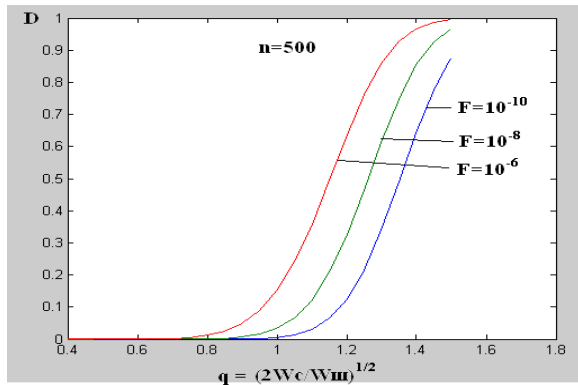


Рис. 3. Графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналів  $D$  від  $q$  при збігу інтервалу аналізу з половиною тривалості радіосигналу

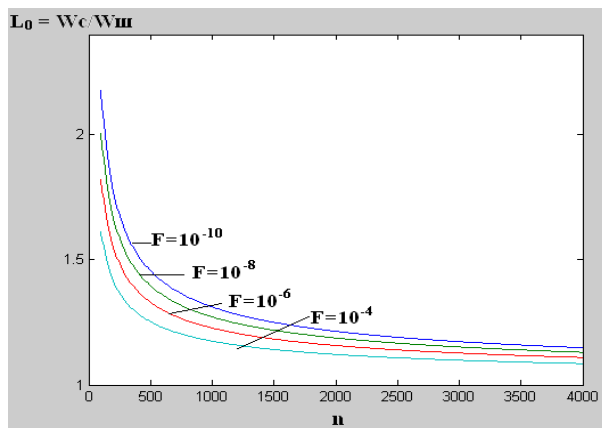


Рис. 4. Графік залежності порогу прийняття рішення про виявлення сигналу від цілі  $L_0$  за критерієм Неймана-Пірсона для моделі  $\chi^2$ -розподілу квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок в залежності від тривалості радіосигналу

### Результати дослідження варіанта алгоритму виявлення-оцінювання дальності до цілі

Дослідженню підлягав алгоритм, аналогом якого є багатоканальний виявляч із затримкою сигналу в кожному каналі на  $\Delta\tau = n\lambda$ ,  $n = 0, 1, \dots, k$ . У кожному каналі оцінюється енергія сигналу на інтервалі рівному тривалості радіосигналу і знаходиться відношення оцінки енергії плинного інтервалу аналізу до усередненої енергії шуму за попередній період слідування зонduючих сигналів, а наступні як відношення плинної енергії до усередненої енергії  $(i-2)$  інтервалу аналізу. Прийняття рішення про виявлення радіосигналу приймається за критерієм « $m$  із  $m$ » (рис. 5). Початок радіосигналу є усереднене значення часу початку радіосигналу в кожному часовому каналі. Аналогічно визначається кінець радіосигналу – за критерієм « $m$  із  $m$ » пропусків у кожному часовому каналі і усередненні часу закінчення радіосигналу в часових каналах.

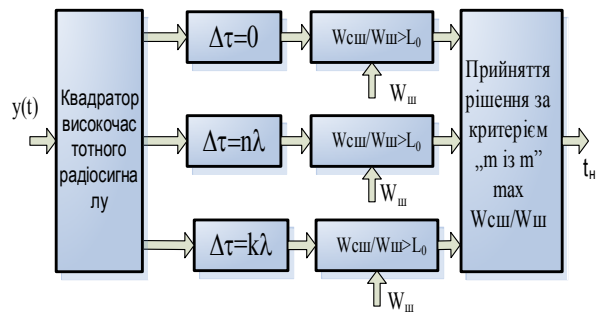


Рис. 5 Алгоритм багатоканального часового виявлення радіосигналу – вимірювання часу його затримки

Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль зонduючого сигналу при тривалості радіосигналу  $\tau = 100\lambda$  і затримці обробки інформації між часовими каналами виявлення  $\Delta\tau = 5\lambda$  при усередненні 1000 реалізацій на кожную точку від енергетичного відношення сигнал/шум наведено на рис. 6.

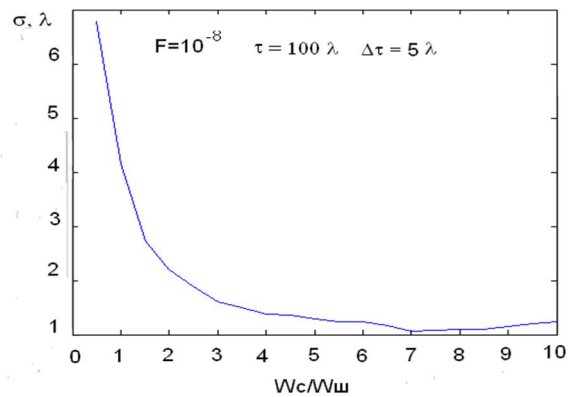


Рис. 6. Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль від енергетичного відношення сигнал/шум

Із рис. 6 видно, що в процесі енергетичного виявлення середньоквадратична помилка визначення дальності до цілі при  $Wc/Wш = 0,5$  складає  $7.35\lambda$ , а при  $Wc/Wш = 10$  –  $1.27\lambda$  при тривалості радіосигналу  $\tau = 100\lambda$  і затримці обробки інформації між часовими каналами виявлення  $\Delta\tau = 5\lambda$  при усередненні 1000 реалізацій на кожную точку для  $F=10^{-8}$ .

Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль зонduючого сигналу при тривалості радіосигналу  $\tau = 100\lambda$  від величини затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення при  $Wc/Wш = 0,5$  при усередненні 1000 реалізацій на кожную точку наведено на рис. 7.

Із рис. 7 видно, що в процесі енергетичного виявлення середньоквадратична помилка визначення дальності до цілі при  $Wc/Wш = 0,5$  від затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення при  $\Delta\tau = \lambda$  складає  $6,5 \lambda$ , а при  $\Delta\tau = 12\lambda$  складає  $7,5 \lambda$  при тривалості радіосигналу  $\tau = 100\lambda$  при усередненні 1000 реалізацій на кожную точку для  $F=10^{-8}$ , що збігається з результатами попередніх досліджень моделі алгоритму виявлення.

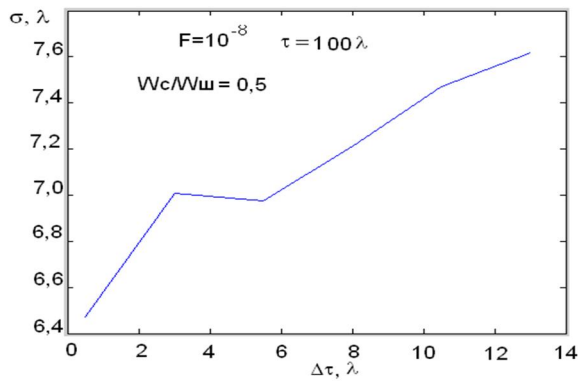


Рис. 7. Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль від величини затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення

Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль зонduючого сигналу при тривалості радіосигналу  $\tau = 100\lambda$  від величини затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення при  $Wc/Wш = 2$  при усередненні 1000 реалізацій на кожену точку наведено на рис. 8.

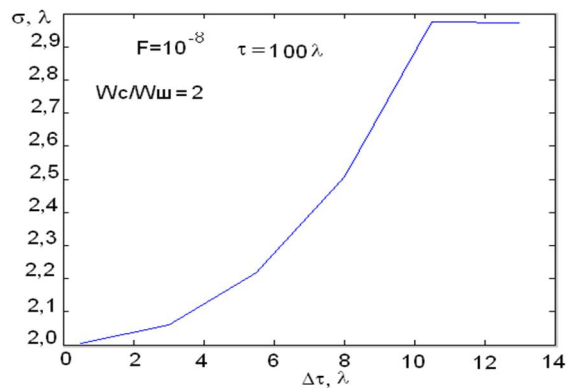


Рис. 8. Графік залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі  $\sigma$  в довжинах хвиль від величини затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення

Із аналізу рис. 6, рис. 7 і рис. 8 видно, що використання енергетичного виявлення в рамках нової теорії дає суттєве поліпшення точнісних характеристик найпростіших радіолокаторів. Очікувана середньоквадратична помилка оцінки дальності виявлення цілей при немодульованих радіосигналах навіть при енергетиці співвимірній з енергетикою внутрішніх шумів радіоприймача складає декілька довжин хвиль, а при відношеннях  $q_E > 5$  – співвимірні з довжиною хвилі зонduючого сигналу.

### Виграш у дальності виявлення цілей

Виграш у дальності виявлення цілей при використанні енергетичного критерію в порівнянні з відомим оцінюється за відношенням максимальних дальностей виявлення цілей при енергетичному виявленні  $r_E$  і при відомому способі виявлення  $r_A$ . Він пропорційний відношенню коефіцієнтів розрізнення

при відомому способі виявлення  $\gamma_\Sigma = W_{\min} / N_0$  і

запропонованому  $\gamma_\Sigma^E = W_{\min}^E / N_0$ :  $\frac{r_E}{r_A} = \sqrt[4]{\frac{q^2}{2s}}$ , де

$W_{\min} = \frac{q^2}{2} N_0$  – мінімальна енергія сигналу для

забезпечення заданих показників якості виявлення сигналу при відомому способі виявлення;  $q$  – відношення сигнал/шум відомого способу виявлення, при якому забезпечуються задані показники якості виявлення радіосигналу: умовна ймовірність правильного виявлення  $P=0,5$ ;  $F=10^{-4}$  для релеєвської моделі амплітудних флуктуацій;  $N_0$  – спектральна щільність потужності шуму;  $W_{\min}^E = sN_0$  – мінімальна енергія сигналу при використанні енергетичного критерію виявлення,  $s=0,2; \dots; 1$ .

Графік залежності відношення дальності виявлення цілі за енергетичним критерієм до дальності виявлення за традиційним методом виявлення від відношення сигнал/шум при використанні критерію Неймана-Пірсона наведено на рис. 9.

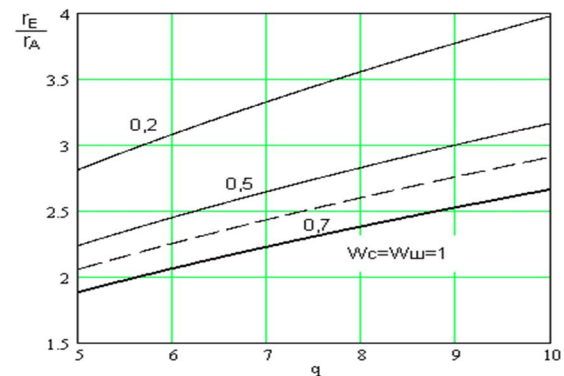


Рис. 9. Виграш у дальності виявлення цілі при енергетичному і традиційному критеріях виявлення від відношення сигнал/шум  $q$

Із рис. 9 видно, що в найгіршому випадку дальність виявлення радіолокаційної цілі при енергетичному критерії виявлення і незмінному потенціалі РЛС зростає майже в два рази для сигналів за енергетикою, співвимірною з енергетикою внутрішніх шумів радіоприймача, або при незмінній дальності виявлення потенціал можливо зменшити в 16 разів, що особливо важливо для орбітальних радіолокаційних станцій.

### Сутність підходу до створення теорії вимірювання при використанні енергетичного відношення правдоподібності

В основу теорії вимірювання параметрів радіосигналів при енергетичному підході, як і в класичному випадку, положена мінімізація умовного

середнього ризику для кожної реалізації у шляхом підбору оцінки  $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(y)$  при заданих функціях вартості і використанні апостеріорного енергетичного відношення правдоподібності  $\max \frac{W_{сш}}{W_{ш}}$  як вимірювального інструменту.

Фізичною основою для побудови вимірювальних систем при енергетичному виявленні радіосигналів у суміші з енергетично співвимірними шумами є когерентні властивості радіосигналів.

В основу енергетичної теорії вимірювання параметрів радіосигналів покладені не дискримінаційні методи, що пов'язані із зменшенням енергії відбитого сигналу, а методи складання радіосигналу із множиною еталонних сигналів, що збільшує енергію виявленого сигналу.

Задум вимірювання параметрів слабких радіосигналів полягає у виявленні радіосигналу (визначенні інтервалу часу, де знаходиться радіосигнал, та визначенні його абсолютної величини енергії), складанні оцифрованих вибірок суміші радіосигналів і шуму з множиною еталонних сигналів за енергетикою, співвимірною з енергетикою виявленого сигналу на високій частоті з безперервною оцінкою енергетичного відношення правдоподібності на кожному кроці аналізу з пошуком її максимуму на інтервалі оцінювання (існування радіосигналу), тобто використовуються когерентні властивості радіосигналів при їх складанні.

$$\sum_{i=1}^K \left\{ x \left[ \sin \left( (2\pi(f + \Delta f_{\hat{a}})t + \varphi_0) \right) \right] + n(t) + \right. \\ \left. + u \left[ \sin \left( (2\pi(f + \Delta f_{\hat{a}^3})t + \varphi_0^3) \right) \right] \right\}$$

Максимальне значення енергетичного відношення правдоподібності відповідає оптимальній оцінці параметра. Процес вимірювання параметрів радіосигналу наведено на рис. 10.

Алгоритм процесу оптимального вимірювання координат цілі полягає в пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності при складанні прийнятого і множини еталонних очікуваних сигналів при зміні параметрів очікуваних сигналів у діапазоні їх можливих значень  $\alpha_1 \dots \alpha_n$  на інтервалі існування радіосигналу, визначеного при оптимальному виявленні (рис. 11).

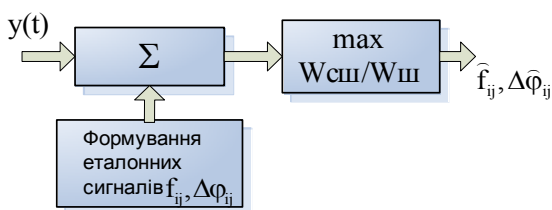


Рис. 10. Процес вимірювання параметрів радіосигналу

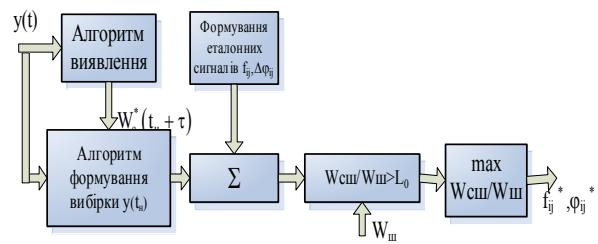


Рис. 11. Алгоритм оптимального за критерієм мінімуму середнього ризику оцінювання параметрів радіосигналу одноканального радіолокатора при використанні енергетичного відношення правдоподібності і послідовного пошуку оцінок на множині еталонних сигналів

Алгоритм визначення доплерівської частоти і початкової фази когерентного радіосигналу при паралельному пошуку їх на множині еталонних сигналів наведено на рис. 12. Сутність алгоритму вимірювання початкової фази і частоти доплера полягає у виявленні інтервалу існування відбитого від цілі сигналу, формуванні оцифрованої вибірки суміші сигналу+шуму на цьому інтервалі часу, паралельному складанні її з сукупністю можливих еталонних значень радіосигналу для вибраного класу об'єктів, визначення енергетичного відношення правдоподібності і прийняття рішення про параметри виявленого радіосигналу за максимумом енергетичного відношення правдоподібності.

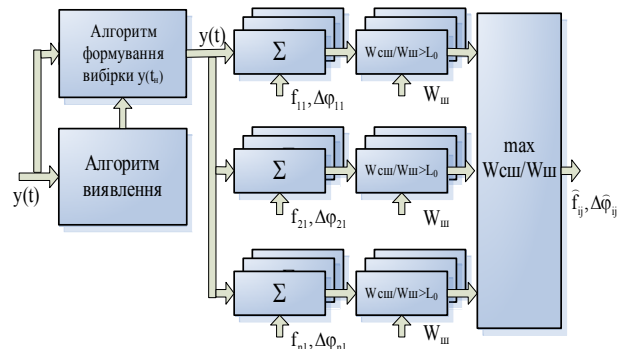


Рис. 12. Алгоритм визначення доплерівської частоти і початкової фази когерентного радіосигналу при паралельному пошуку їх на множині еталонних сигналів

### Оцінка кутових координат приходу радіосигналів фазовим методом

При оцінці кутових координат використовуються відомі антенні системи з просторовим рознесенням кутомірних каналів РЛС (рис. 13). Вимірювання параметрів основного каналу здійснюється за алгоритмом рис. 12.

Для оцінки різниці фаз основного і кутомірного каналів необхідне знання початкової фази кутомірного каналу.

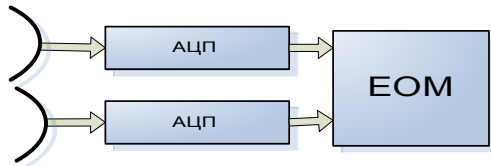


Рис. 13. Цифровий фазовий пеленгатор

Оцінка початкової фази кутомірного каналу полягає у знаходженні  $\max \frac{W_{cf}}{W_i}$  при складанні вибірок сигналу кутомірного каналу з еталонною послідовністю вибірок очікуваного сигналу на множині можливих зрушень фаз сигналів у діапазоні  $0 \dots 2\pi$  з урахуванням доплерівської частоти основного каналу. Кутові координати відповідають різниці початкових фаз основного і кутомірного каналів. Для усунення неоднозначності вимірювань необхідне використання двобазового методу вимірювань. Неоднозначність усувається також за рахунок різних часових положень виявлених у каналах радіосигналів.  $W_c^*(t_i + \tau)$  (рис. 14).

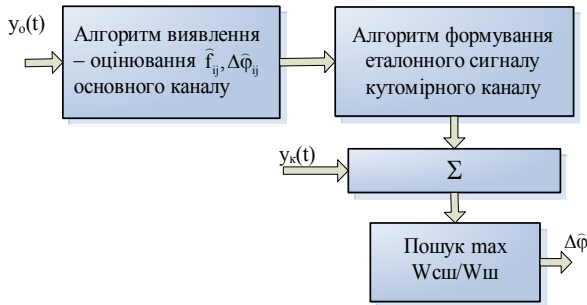


Рис. 14. Алгоритм визначення різниці фаз кутомірного і основного каналів при визначеній доплерівській частоті

### Принципи розпізнавання впливу активних шумових і пасивних перешкод на радіоприймач

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

$$\max_{0-T} \frac{W_{ш} + W_c + W_{an}}{W_{ш}} \frac{0-\tau_i}{0-\tau_{i-2}}$$

де  $W_{an}$  – абсолютний енергетичний рівень активної перешкоди.

При відсутності сигналу відношення правдоподібності покаже рівень активної перешкоди.

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

$$\max_{0-T} \frac{W_{ш} + W_c + W_{an}}{W_{ш} + W_{an}} \frac{0-\tau_i}{0-\tau_{i-2}}$$

Досліджувався вплив активних шумових перешкод на стійкість вимірювань параметрів радіосигналів з рівнем енергії співвимірним або меншим енергії внутрішніх шумів з використанням енергетичного відношення правдоподібності.

Результати дослідження стійкості енергетичного критерію при впливі активних шумових перешкод при відсутності помилок вимірювання енергії і при 10% точності наведені на рис. 15. Із рис. 15 видно, що навіть при нереально високих рівнях маскуючих перешкод, енергетичний критерій є дієздатним.

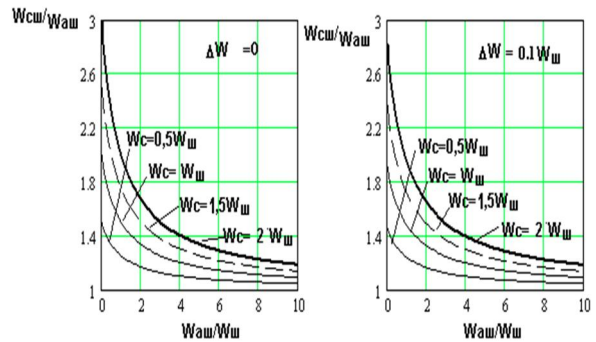


Рис. 15. Результати дослідження стійкості енергетичного критерію при впливі активних шумових перешкод

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

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 слабкого сигналу меншого рівня шуму наведена на рис. 17.

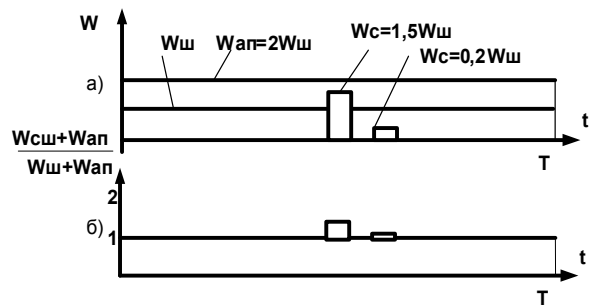


Рис. 16. Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою, що в 2 рази перевершує рівень власних шумів без урахування флуктуацій усередненої енергії внутрішніх шумів

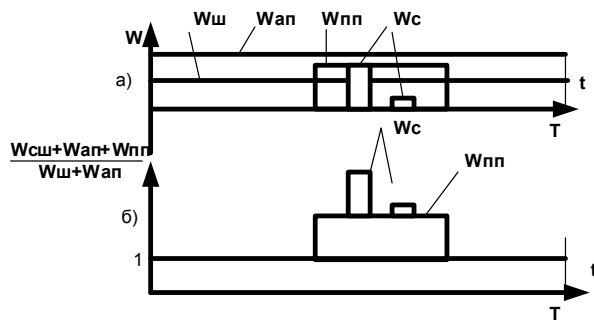


Рис. 17. Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіолокаційного сигналу на фоні активної маскуючої перешкоди за енергетикою, що в 2 рази переверщує рівень власних шумів, пасивної перешкоди за енергетикою, рівною енергетиці сигналу від цілі і слабого сигналу меншого рівня шуму

Із рис. 17 б) слідує, що енергетичний підхід до аналізу радіосигналів дозволяє розпізнати складну перешкодову обстановку

$$\max_{0-T} \frac{W_{ш} + W_{с} + W_{ан} + W_{пп}}{W_{ш} + W_{ан} + W_{пп}} > L_0,$$

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

Процес виявлення радіосигналів на фоні активних і пасивних перешкод наведено на рис. 18. Він відрізняється від процесу (див. рис. 1) тим, що на етапі формування енергетичного відношення правдоподібності в якості знаменника використовується усереднене значення енергії внутрішнього шуму за попередній період роботи РЛС. Прийняття рішення про виявлення активних і пасивних перешкод здійснюється при використанні відрізняльної ознаки за тривалістю, більшою тривалості радіосигналу, наприклад, за критерієм « $m$  із  $m$ ».

Рис. 18. Процес виявлення радіосигналів на фоні активних і пасивних перешкод

### Сутність захисту від перешкод

Сутність компенсації перешкод при використанні енергетичного критерію на інтервалі існування радіосигналу полягає у видаленні радіосигналу із

суміші сигналу+шуму з подальшим відніманням отриманої різниці від реалізації суміші сигнал+шум+перешкода. Показником якості компенсації перешкод є відношення енергетичної правдоподібності  $\max \frac{W_{сш}}{W_{ш}}$ .

Синтез приймача можливий і при одночасному виявленні-вимірюванні параметрів радіосигналу-компенсації перешкод при використанні енергетичного відношення правдоподібності, пошуку його максимального значення в області аналізу можливих еталонних значень. Варіант алгоритму виявлення-вимірювання-компенсації радіоперешкод при впливі активних шумових перешкод за енергетичним критерієм правдоподібності наведено на рис. 19.

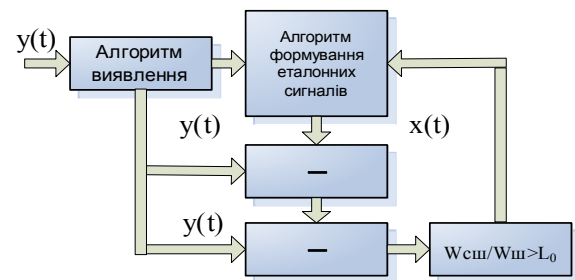


Рис. 19. Алгоритм виявлення-вимірювання компенсації радіоперешкод при впливі активних шумових перешкод за енергетичним критерієм правдоподібності

### Висновки

Використання наведеного варіанта енергетичного критерію та способу оптимального виявлення радіосигналу від цілі цифровими РЛС відкриває перспективу побудови нових низькопотенційних радіолокаторів, підвищення можливостей існуючих РЛС і вимагає дослідження можливостей використання способу енергетичного виявлення і підтвердження на практиці.

Виходячи із розглянутого методу енергетичного виявлення слідує, що 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 теорії оцінки 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-оцінювання параметрів радіосигналів.

Очікуваними обмеженнями практичного застосування енергетичної теорії виявлення-оцінювання



параметрів радіосигналів на несучій частоті є відсутність засобів аналого-цифрового перетворення для сигналів з довжиною хвиль сантиметрового діапазону, міліметрового та менших, що вимагає перевірки можливості обробки радіосигналів на проміжних частотах. Результати досліджень можуть бути узагальнені на радіотехнічні системи, де використовується процес виявлення радіосигналів на фоні внутрішнього шуму і радіоперешкод.

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

## Список літератури

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, С.А. Гориков, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко / За ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.

2. Метод энергетического выявления радиосигналов / Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Д.В. Карлов, Ю.В. Трофименко // Системы управления, навигации та зв'язку. – К., 2010. – № 4(16). – С. – 33-37.

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.

### Теоретические основы энергетического обнаружения–оценивания параметров радиолокационных сигналов

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

*Изложены основные результаты фундаментальных исследований в отрасли теории радиолокации и их практического приложения в радиотехнических системах. Новизна исследований заключается в том, что в рамках закона сохранения энергии и байесовской статистической теории принятия решений рассматривается новый подход к процессу обнаружения радиолокационных сигналов от целей по энергетическому критерию. Рассматривается сущность энергетической теории обнаружения-оценивания для радиолокационных, радионавигационных систем, систем управления и связи. Формулируется условие оптимального энергетического обнаружения радиосигналов на фоне собственных шумов приемника. Анализируется чувствительность критерия к обнаружению слабых по энергетике радиосигналов на фоне собственных шумов приемника, активных и пассивных помех, оценивается выигрыш в дальности обнаружения при энергетическом и традиционном критериях обнаружения. Излагаются основные принципы построения теории оценивания параметров радиосигналов с непосредственным использованием энергетического отношения правдоподобия.*

**Ключевые слова:** энергетический критерий выявления радиолокационных сигналов, энергетическое отношение правдоподобности, радиолокационная станция (РЛС), обнаружение целей, оптимальное энергетическое обнаружение целей, активные и пассивные помехи, принципы построения теории оценивания параметров радиосигналов.

### Theoretical bases of power exposure and evaluation of radio-location signals parameters

Pevtsov G.V., Yatsutsenko A.Ya., Karlov D.V., Trofimenko Yu.V.

*The basic results of fundamental researches in the sphere of theory of radio-location and their practical application into the radio engineering systems are expounded. The novelty of research is in the fact, that within the framework of low energy conservation and Bayes statistical theory of decision making, new approach to the process of radio-location signals detection from targets by power criterion is examined. Essence of power theory of exposure-evaluation is examined for the radio-location, radio-navigation systems, and control and communication systems. The condition of optimum power exposure of radio signals is formulated on the background of receiver's own noises. The sensitiveness of criterion to the exposure of energetically weak radio signals is analysed on the background of receiver's own noises, active and passive obstacles, gain is estimated in distance of exposure when employing power and traditional criteria of exposure. Basic principles of construction of evaluation theory of radio signals parameters with the direct use of power relation of plausibility are laid out.*

**Keywords:** energy relation of probability, radar locator, target acquisition, optimum power target acquisition, active and passive jamming, design concepts of radio signal parameters' estimation theory.