

УДК 629.7:621.396

Г.В. ПЕВЦОВ, д-р техн. наук, **А.Я. ЯЦУЦЕНКО**, канд. техн. наук, **М.Ф. ПІЧУГІН**, канд. військ. наук, **Д.В. КАРЛОВ**, канд. техн. наук, **Ю.В. ТРОФИМЕНКО**, наук. співробітник (Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба), **М.В. БОРЦОВА**, асистент кафедри (Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків)

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ВИЯВЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ. ОСНОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ

Викладено альтернативний варіант теорії виявлення радіосигналів, яку розроблено на основі урахування закону збереження енергії і байєсової безумовної оптимізації статистичних рішень. Енергетичне виявлення радіосигналу – це пошук інтервалу часу, де сумарна енергія сигналу й шуму по відношенню до усередненої енергії внутрішнього шуму перевищує поріг виявлення із заданими якісними показниками. Розглядаються способи послідовного й паралельного енергетичного виявлення радіосигналів на радіочастоті, за енергетикою сумірних або менших рівня внутрішнього шуму радіоприймача без урахування й з урахуванням впливу зовнішніх активних маскувальних перешкод.

Излагается альтернативный вариант энергетической теории обнаружения радиосигналов, разработанной на основании учета закона сохранения энергии и байесовой безусловной оптимизации статистических решений. Энергетическое обнаружение радиосигнала – это поиск интервала времени, в котором суммарная энергия сигнала и шума по отношению к усредненной энергии внутреннего шума превышает порог обнаружения с заданными качественными показателями. Рассматриваются способы последовательного и параллельного энергетического обнаружения радиосигналов на радиочастоте, по энергетике соизмеримых или меньших уровня внутреннего шума радиоприемника без учета и с учетом влияния внешних активных маскирующих помех.

An alternative variant of radio-signals energy detection theory developed on the basis of energy conservation law and Bayes unconstrained optimization of statistical decisions is considered. Radio-signal energy detection implies search of a time interval where the total signal-and noise energy against average internal noise energy exceeds the detection threshold with the given qualitative measure. The methods of sequential and parallel radio-signals energy detection at radio frequency for the signals commensurable or lower than the level of radio-receiver internal noise when the influence of external active masking interference is not taken and taken into account are discussed.

1. Принципи байєсової статистичної оптимізації і причина того, що класична радіолокація не виявляє сигналів, менших рівня шуму, за їхньою енергетикою

У радіолокації головним завданням режиму огляду зони контролю є виявлення цілей. З виходу антенної системи відбиті від цілей радіосигнали надходять на приймальний пристрій спільно із зовнішніми перешкодами й складаються з внутрішніми шумами приймача. Шуми й перешкоди є випадковими процесами. Тому виявлення радіосигналів базується на теорії статистичних рішень, які викладено в роботі [1].

У класичній радіолокації завдання виявлення ставиться так. На вхід приймача надходить

випадкова реалізація $y(t)$ адитивної суміші радіосигналу $x(t)$ й шуму $n(t)$ $y(t) = x(t) + n(t)$. За цією реалізацією $y(t)$ протягом часу, який задано, маючи спостереження T , необхідно якнайкращим способом вирішити: «є сигнал» чи «немає сигналу». При цьому можливі помилки: першого роду – відбувається помилкове виявлення шумового походження (хибна тривога) й помилка другого роду – пропуск цілі.

Простір вхідних реалізацій позначимо G , а простір параметра θ позначимо Ω . Розподіл імовірності $y = y(t)$ залежить від невідомого θ . Послідовність величин $y(t_i)$ має m -вимірну щільність розподілу ймовірності $w(y/\theta)$ у разі заданого значення θ . У разі використання множини рішень D з елементами d_i й простору вирішальних правил Δ

© Г.В. ПЕВЦОВ, А.Я. ЯЦУЦЕНКО, М.Ф. ПІЧУГІН, Д.В. КАРЛОВ, Ю.В. ТРОФИМЕНКО, М.В. БОРЦОВА, 2015

з рішеннями δ_i відношення правдоподібності з метою бінарного виявлення визначимо для

$$\theta = \begin{cases} 1 & \text{— функція втрат переходить у квадратну матрицю} \\ 0 & \end{cases}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} \\ C_{10} & C_{11} \end{bmatrix}$$

Вважаючи, що $C_{00} = C(0, d_0) = C_{11} = C(1, d_1) = 0$ (втрат немає) і

$$C_{01} = C(0, d_1) > 0; C_{10} = C(1, d_0) > 0$$

$$\Lambda = \frac{w(y/1)}{w(y/0)} > \frac{q(C_{01} - C_{00})}{p(C_{10} - C_{11})}$$

Величина $\Lambda(y) = \frac{w(y/1)}{w(y/0)}$ — називається відношенням правдоподібності, а величина $\frac{q(C_{01} - C_{00})}{p(C_{10} - C_{11})} = L_0$ — порогом прийняття рішення.

Алгоритм виявлення полягає у визначенні відношення правдоподібності $\Lambda(y)$, порога ухвалення рішення L_0 і порівняння з порогом ухвалення рішення L_0 :

$$\Lambda(y) \underset{>}{<} L_0$$

Критерії ухвалення рішень у разі байесової статистичної оптимізації подано в табл. 1 [1].

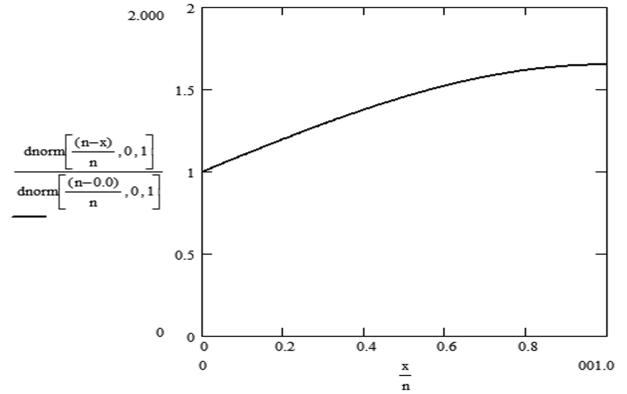


Рис. 1. Залежність відношення правдоподібності від відношення амплітуд сигналу й шуму

Аналіз табл. 1 показав, що байесів підхід статистичної оптимізації дозволяє виявляти радіосигнали, які нижчі за рівень шуму. Це видно з порога ухвалення рішення для критерію максимуму правдоподібності. Окрім того, з рис. 1 видно, що безпосереднє використання відношення правдоподібності для гаусівської моделі амплітудних флуктуацій внутрішніх шумів у разі детермінованого радіосигналу дозволяє виявляти і радіосигнали, що нижчі рівня внутрішнього шуму приймача.

Таблиця 1. Критерії ухвалення рішень у разі байесової статистичної оптимізації [1]

Критерій ухвалення рішення	Поріг	Графічна інтерпретація
Однопороговий Байєса $\Lambda = \frac{w(y/\theta = 1)}{w(y/\theta = 0)} \geq L_0$	$L_0 = \frac{q(C_{01} - C_{00})}{p(C_{10} - C_{11})}$	
Однопороговий Неймана – Пірсона	$\int_{L_0}^{\infty} w(y/0) dy = F$	
Однопороговий максимуму апостеріорної імовірності	$L_0 = \frac{q}{p}$	
Однопороговий максимуму правдоподібності	$L_0 = 1$	
Однопороговий мінімаксий	$L_0 = \left(\frac{q}{p} \right)_{MM} \frac{(C_{01} - C_{00})}{(C_{10} - C_{11})}$	
Двопороговий Вальда	$L_a \approx \frac{D}{F} \quad L_i \approx \frac{1-D}{1-F}$	

Чому в класичній радіолокації не виявляються радіосигнали, які нижчі за рівень шуму?

Не оцінюється значення відношення правдоподібності й не використовується безпосередньо з метою обробки інформації випадкових процесів.

У разі виведення відношення правдоподібності в класичній радіолокації чисельник і знаменник

$$\Lambda = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (y_k - u_k)^2\right\}}{\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (y_k)^2\right\}}$$

скорочуються на множник

$$\exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (y_k)^2\right\},$$

і тоді відношення правдоподібності має вигляд $\Lambda = \exp\left\{\frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^n u_k y_k - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n u_k^2\right\}$,

що фізично відповідає відділенню сигналу від шуму, чого в реальності не відбувається.

У постановці завдання в моделі радіосигналу не обумовлено використання еталонного радіосигналу.

2. Постановка завдання енергетичного виявлення

На основі закону збереження енергії і байєсівської безумовної оптимізації статистичних рішень в енергетичній теорії виявлення ставиться завдання виявити інтервал часу, де зосереджена сумарна енергія сигналу й шуму щодо усередненої енергії шуму в разі статистичної обробки випадкового процесу та використанні критерію мінімуму середнього ризику.

Прийняття рішення про виявлення сумарної енергії сигналу й шуму здійснюється після порівняння енергетичного відношення правдоподібності з порогом ухвалення рішення (наприклад, за критерієм Неймана – Пірсона).

3. Сутність енергетичної теорії виявлення радіосигналів

У енергетичній теорії виявлення формулюється як завдання виявлення інтервалу часу, де сумарна енергія сигналу й шуму щодо усередненої енергії шуму перевищує поріг виявлення, що дозволяє врахувати закон збереження енергії в разі статистичної обробки випадкового процесу.

У разі енергетичного виявлення радіосигналів, як і в класичній теорії виявлення [2], з метою ухвалення рішення про виявлення радіосигналу використовується критерій мінімуму середнього ризику

$$\begin{aligned} \bar{r} &= r_{i0} P(A_1)(1-D) + r_{i\delta} P(A_0)F, \\ \bar{r} &= r_{np} P(A_1) - r_{i\delta} P(A_1)(D-l \cdot F), \end{aligned} \quad (1)$$

де $l = \frac{r_{\delta 0} D(A_0)}{r_{i\delta} D(A_1)}$ – ваговий множник; $r_{i\delta}, r_{i0}$ – ризику хибної тривоги й пропуску цілі; $P(A_1)$ – вірогідність наявності цілі; $P(A_0)$ – імовірність відсутності цілі; D – умовна ймовірність правильного виявлення; F – умовна ймовірність хибної тривоги.

Мінімум вираз (1) маємо при

$$[D - L_0 F] = \int_{-\infty}^{\infty} p_n(y^2) A^*(\delta^2) [L(y^2) - L_0] dy = \max,$$

де $A^*(y^2)$ – оптимальне правило ухвалення рішення щодо виявлення відносної сумарної енергії сигналу й шуму; $L(y^2) = \frac{\delta_{sn}(y^2)}{\delta_n(y^2)}$ – енергетичне відношення правдоподібності на відміну від класичного підходу; $p_{sn}(y^2)$ – щільність імовірності розподілу сумарної енергії сигналу й шуму; $p_n(y^2)$ – щільність імовірності розподілу енергії внутрішнього шуму приймача. Енергетичне відношення правдоподібності враховує закон збереження енергії; L_0 – поріг виявлення, який визначається, як прийнято в радіолокації, критерієм Неймана – Пірсона.

У разі енергетичного підходу необхідно оцінити щільність імовірності сумарної енергії сигналу й шуму $p_{sn}(y^2)$ після відношення до щільності імовірності розподілу енергії шуму $p_n(y^2)$.

Оскільки щільність імовірності розподілу сумарної енергії сигналу й шуму залежить від часу запізнювання радіосигналу та його енергії, то в умовах апріорної невизначеності часового запізнювання радіосигналу виникає необхідність оцінки сумарної енергії сигналу й шуму на всіх інтервалах аналізу $m = T/\tau$ протягом періоду проходження зондувальних радіосигналів. Апостеріорна щільність імовірності розподілу сумарної енергії сигналу й шуму безпосередньо пов'язана з оцінками енергії на всіх інтервалах аналізу. Очевидним є припущення, що енергетичне відношення правдоподібності $L(y^2)$ функціонально пов'язано з оцінками енергії поточної реалізації у :

$$L(y^2) \square K(y^2) = \frac{W_{sn}^{\tau_i}}{W_n^{\tau_{i,2}}} \quad \forall i \in 1 \dots m,$$

де $W_{sn} = \sum_{k=0}^n \{y_k\}^2 \Delta t_k$ – оцінка енергії нероздільної суми амплітуд сигнал+шум на інтервалі, рівному тривалості радіосигналу; n – загальна кількість дискретних вимірів на інтервалі статистичного аналізу τ ; $W_n = \frac{1}{M} \left[\sum_{k=0}^n \{\xi_k\}^2 \Delta t_{k1} + \sum_{j=0}^n \{\xi_j\}^2 \Delta t_j + \dots \right]$ – оцінка усередненого значення енергії вхідної реалізації шуму на M інтервалах, рівних тривалості радіосигналу.

Отримане відношення статистичної оцінки сумарної енергії сигналу й шуму до усередненої енергії шуму за декілька попередніх інтервалів аналізу називатимемо надалі енергетичним відношенням правдоподібності, маючи на увазі тільки його функціональний зв'язок.

Поріг ухвалення рішення в разі виявлення радіосигналу L_0 у радіолокації визначається за критерієм Неймана – Пірсона з виразу умовної імовірності хибної тривоги. Для моделі χ^2 -розподілу суми квадратів амплітуд, що оцифровано, гаусівських шумових вибірок умовна ймовірність хибних тривог має вигляд [2, 3]

$$F = \frac{1}{\sqrt{2^n \sigma^{2n}} \Gamma(n/2)} \int_{L_0}^{\infty} \left(\frac{y}{2\sigma^2} \right)^{n-1} \exp\left(-\frac{y}{2\sigma^2}\right) dy.$$

Вимога обмеження умовної імовірності хибної тривоги приводить до небайєсівського критерію Неймана – Пірсона, як це зазначено в роботі [2].

4. Якісні показники енергетичного виявлення детермінованого радіосигналу у разі гаусівської моделі амплітуд випадкових величин внутрішнього шуму

З метою визначення щільності ймовірності розподілу суми енергій детермінованого радіосигналу з амплітудою a_i і гаусівських шумових вибірок ξ_i розглянемо

$$\sum_{i=1}^n (\xi_i + a_i)^2 = \sum_{i=1}^n \xi_i^2 + \sum_{i=1}^n (2a_i \xi_i + a_i^2).$$

Функція розподілу суми квадратів гаусівської випадкової величини $\sum_{i=1}^n \xi_i^2$ описується χ^2 -розподілом [3]

$$f_{\xi_i^2} = \frac{1}{\sigma^2} f_{\chi^2} \left(\frac{y}{\sigma^2} \right),$$

доданок $\sum 2a_i \xi_i$ має гаусівську функцію розподілу

$$f_{\sum 2a_i \xi_i} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sum 4a_i^2 \sigma^2}} e^{-\frac{y^2}{\sum 4a_i^2 \sigma^2}} = N\left(0, \sqrt{4a_i^2 \sigma^2}\right).$$

Розподіл суми випадкових величин

$\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)$ має гаусівську функцію розподілу

$$f_{\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi \sum (2a_i \xi_i + a_i^2)}} e^{-\frac{y^2 - \sum a_i^2}{\sum 4a_i^2 \sigma^2}} = N\left(\sum a_i^2, \sqrt{\sum (2a_i \xi_i + a_i^2)}\right).$$

Щільність імовірності розподілу квадрата суми випадкових величин має вигляд інтеграла згортки гаусівської функції розподілу й χ^2 -розподілу:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\chi^2} \left(\frac{t}{\sigma^2}, n \right) f_N \left((y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right) dt. \quad (2)$$

Інтегральна функція розподілу випадкової величини (2) характеризує умовну ймовірність хибного виявлення сумарної енергії сигналу й шуму за відсутності сигналу

$$F(y) = \int_{L_0}^{\infty} f(y) dy. \quad (3)$$

Умовна ймовірність правильного виявлення радіосигналу визначається за виразом

$$D = \frac{1}{\sigma^2} \int_{L_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\chi^2} \left(\frac{t}{\sigma^2}, n \right) f_N \left((y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right) dt dy, \quad (4)$$

де $f_N \left((y-t), \sum a_i^2, \sqrt{\sum 4a_i^2 \sigma^2} \right)$ – гаусівська функція розподілу суміші детермінованого сигналу й шуму.

Поріг енергетичного виявлення сумарного радіосигналу й шуму L_0 визначається з 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.

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

$$1 - F_{\chi^2}(x, n) = F; \quad x = \frac{L_0}{\sigma^2 \Delta t}, \quad (5)$$

звідки поріг виявлення

$$L_0 = x \sigma^2 \Delta t, \quad (6)$$

де σ^2 – дисперсія випадкового процесу $y(t)$, яку визначено на інтервалі, де відсутній радіосигнал; L_0 – поріг ухвалення рішення про виявлення радіосигналу із заданою ймовірністю хибної тривоги F ; $F_{\chi^2}(x, n)$ – табульована функція χ^2 -розподілу суми квадратів амплітуд, які оцифровано шумовими вибірками n ; x – значення табульованої інтегральної функції χ^2 -розподілу суми квадратів амплітуд шумових вибірок, які оцифровано.

Умовна ймовірність правильного виявлення енергії сумарного детермінованого сигналу й гаусівського шуму в разі різної тривалості радіосигналів щодо фіксованої умовної імовірності хибної тривоги F й збігу інтервалу аналізу з тривалістю радіосигналу залежно від відношення енергій сигналу й шуму, які отримано з виразу (4) методом чисельного інтегрування, показано на рис. 2.

З рис. 2 випливає, що зі збільшенням тривалості радіосигналів поліпшується чутливість приймача до слабких радіосигналів. Гарантовано (з $D = 0,9$ $F = 10^{-6}$) виявляються слабкі радіосигнали з енергією 0,2 енергії шуму в разі тривалості $n > 5 \cdot 10^3$ (більших 500λ) з метою урахування того, що частота оцифрування радіосигналу на порядок вище частоти, яку він несе.

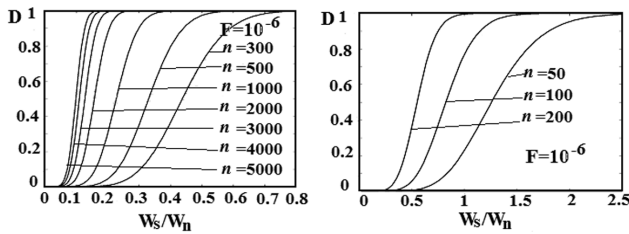


Рис. 2. Умовна ймовірність правильного виявлення сумарної енергії детермінованого радіосигналу різної тривалості й гаусівського шуму від відношення енергій радіосигналу та шуму

Справедливе і твердження, що в разі фіксованої тривалості радіосигналу за певних умов (які необхідно надалі з'ясувати) із збільшенням числа вибірок (точність виміру енергій сигналу й шуму) збільшується чутливість приймача (із запропонованим способом обробки) до слабких радіосигналів.

Умовна ймовірність правильного виявлення енергії сумарного детермінованого сигналу й гаусівського шуму в разі різних умовних ймовірностей хибних тривог F тривалих ($n \geq 10^5$) радіосигналів залежно від відношення енергій сигналу й шуму зображена на рис. 3.

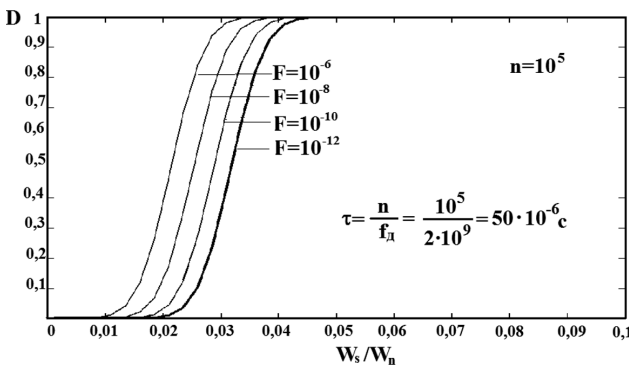


Рис. 3. Умовна ймовірність правильного виявлення сумарної енергії для моделі детермінованого тривалого радіосигналу й гаусівського шуму

5. Результати моделювання процесу енергетичного виявлення радіосигналу з відомими параметрами

На рис. 4 зображені графіки залежності умовної ймовірності правильного виявлення D енергії суми детермінованого радіосигналу з випадковою початковою фазою й гаусівського шуму в разі збігу інтервалу аналізу з тривалістю радіосигналу a й з половиною тривалості радіосигналу b для $F = 10^{-6}$; 10^{-8} ; 10^{-10} від амплітудного відношення сигнал/шум q відомого способу виявлення в разі тривалості сигналу пропорційній n вибірок, отримані з

імітаційної аналого-цифрової моделі статистичним шляхом для несучої частоти $f = 2 \cdot 10^8$ Гц й частоти оцифрування $f_{\delta} = 2 \cdot 10^9$ Гц у разі усереднення 10^5 реалізацій на кожну точку. На рис. 5 показано графік залежності порога прийняття рішення про виявлення сумарної енергії сигналу від цілі та шуму $L_0 = W_{sn} / W_n$ за критерієм Неймана – Пірсона для моделі χ^2 -розподілу суми квадратів амплітуд оцифрованих шумових вибірок від числа вибірок n для значень умовної ймовірності хибних тривог 10^{-4} ; 10^{-6} ; 10^{-8} ; 10^{-10} .

Із порівняння умовної ймовірності правильного виявлення енергії суми радіосигналу й шуму (рис. 2), оцінених за виразом (4) та отриманих шляхом статистичного моделювання для $n=500$ і випадкової початкової фази (рис. 6), видно їхню відповідність для випадку збігу інтервалу аналізу з тривалістю радіосигналу.

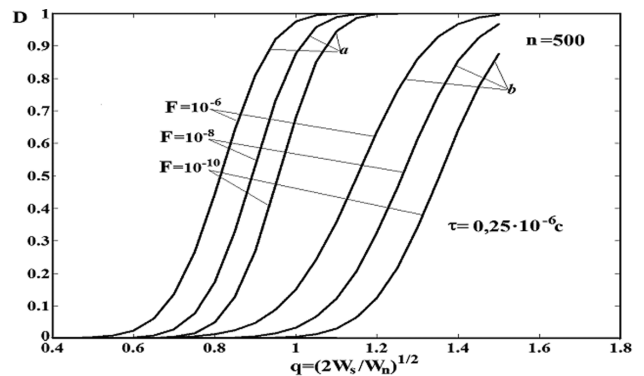


Рис. 4. Залежності умовної ймовірності правильного виявлення радіосигналу від його тривалості

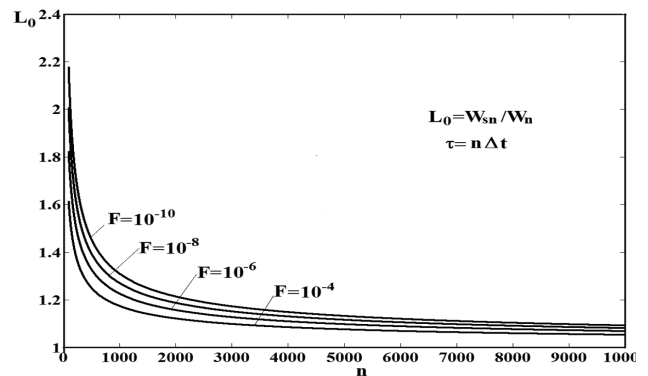


Рис. 5. Залежності порога прийняття рішення про виявлення радіосигналу від його тривалості

6. Виграш у дальності виявлення цілей

Виграш у дальності виявлення цілей з метою використання енергетичного критерію в порівнянні

з класичною теорією виявлення [1, 2] можливо оцінити шляхом порівняння кривих виявлення класичної радіолокації й тих, що отримано в енергетичній теорії як шляхом моделювання, так й при теоретичній оцінці, виходячи з щільності ймовірності розподілу сумарної енергії сигналу й шуму, яка визначається інтегралом згортки гаусівського та χ^2 -розподілів, за відношенням максимальних дальностей виявлення цілей при енергетичного виявлення r_E й відомому [1] способі виявлення r_A :

$$\frac{r_E}{r_A} = \sqrt[4]{\frac{\gamma_\Sigma^A}{\gamma_\Sigma^E}}, \text{ де } \gamma_\Sigma^E \text{ і } \gamma_\Sigma^A \text{ – коефіцієнти розрізненості.}$$

Криві виявлення сигналів з повністю відомими параметрами, з випадковою початковою фазою і сигналів з релеївськими флуктуаціями класичної радіолокації показані на рис. 6 [2].

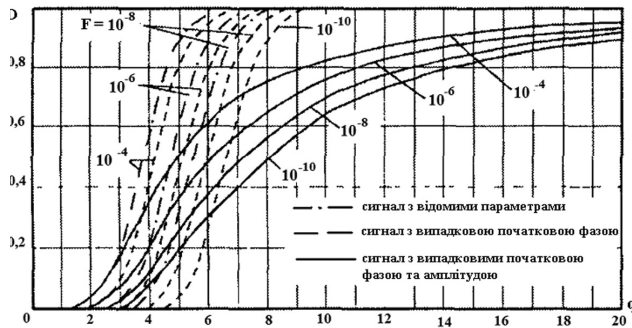


Рис. 6. Умовна ймовірність правильного виявлення сигналів з повністю відомими параметрами, з випадковою початковою фазою і сигналів з релеївськими флуктуаціями класичної радіолокації

Оскільки криві виявлення енергетичної теорії істотно залежать від тривалості радіосигналу, то й оцінки виграшу будуть різними для різної тривалості радіосигналів. Коректним є порівняння виграшу для моделі детермінованого радіосигналу енергетичної теорії і кривих виявлення сигналу з випадковою початковою фазою класичної теорії.

З формули $\frac{r_E}{r_A}$ і кривих виявлення класичної радіолокації та енергетичної теорії (рис. 2–6) видно, що в якнайгіршому випадку дальність виявлення радіолокаційної цілі при енергетичному критерії виявлення й незмінному потенціалі РЛС при $F = 10^{-6}$ $D = 0,9$ виросте більш ніж в 2,62 разу для радіосигналів з випадковою початковою фазою, які збіглися з інтервалом аналізу. Виграш в дальності виявлення для тривалих сигналів з $\tau \ll 10^4 \lambda$ складає в ідеальному випадку 5,3 разу (табл. 2).

Таблиця 2. Виграш у дальності в разі енергетичного виявлення

n	W_s/W_n $F=10^{-6}; D=0,9$	q^E	q^A	r_E/r_A
500	0,45	0,9486	6,5	2,618
1000	0,3	0,7746	6,5	2,897
1500	0,25	0,7071	6,5	3,032
4500	0,145	0,538	6,5	3,476
6500	0,1	0,447	6,5	3,813
10^5	0,027	0,2323	6,5	5,289

7. Способи практичної реалізації енергетичного виявлення радіосигналів

Послідовне (одноканальне) виявлення. Суть практичного застосування способу енергетичного виявлення радіосигналів, який запропоновано в роботах [4, 5] полягає в розбитті періоду проходження радіосигналів T на інтервали часу, рівні тривалості очікуваного сигналу τ , й виміри енергії на кожному з них. Значення енергій, які набуто, є джерелом визначення послідовності енергетичних відношень правдоподібності $\|L(y^2)\|$.

Енергетичне відношення правдоподібності початкових інтервалів аналізу визначається як відношення оцінки енергії поточного інтервалу аналізу до усередненої енергії шуму за попередній період проходження зондуючих сигналів, а наступних – як відношення поточної енергії до усередненої енергії $(i-2)$ інтервалу аналізу. Ухвалення рішення про виявлення радіосигналу в кожному інтервалі аналізу здійснюється після порівняння значення енергетичного відношення правдоподібності $L(y^2)$ для довільного закону розподілу випадкових величин з порогом ухвалення рішення L_0 :

$$L(y^2) = \frac{W_{sn} \pm \Delta W}{W_n} > L_0 \quad \forall i \in 1 \dots m,$$

де $\pm \Delta W(y^2)$ – величина енергетичних флуктуацій поточного значення енергії шуму відносно усередненого значення енергії шуму й визначає граничну чутливість способу виявлення.

В цьому разі процес енергетичного виявлення дозволяє зробити квазіоптимальний прийом за енергетикою на підставі аналізу пропорції відношення (сигнал+шум)/шум в двох інтервалах аналізу й зрушити інтервал аналізу на відстань, пропорційну цьому відношенню, та отримати

максимальне енергетичне відношення на інтервалі оцінювання. Положення сигналу, квазіоптимальне в енергетичному відношенні (сигнал+шум)/шум, визначається виразом початку цього інтервалу аналізу

$$t_o = t_k - \frac{(W_1 - W_n)}{W} \tau, \quad (7)$$

де $W = (W_1 - W_n) + (W_2 - W_n)$ – енергія сигналу в разі оптимального енергетичного виявлення; $(W_1 - W_n)$; $(W_2 - W_n)$ – енергії сигналу в першому та другому інтервалах аналізу; t_k – положення центра двох сусідніх інтервалів аналізу, які перевищили поріг виявлення (у разі рівності енергій $(W_1 - W_n) = (W_2 - W_n)$ положення сигналу від цілі визначається як $(t_k - \frac{\tau}{2})$); W_n – значення усередненої енергії шуму; W_i – значення енергії суміші сигналу й шуму в i -му інтервалі аналізу.

Завершальне ухвалення рішення про оптимальне енергетичне виявлення здійснюється шляхом пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності в разі зміни інтервалу аналізу, пропорційному діапазону можливих флуктуацій поточного значення енергії шуму відносно усередненого значення $\pm \Delta t$:

$$t_o = (t_k - \frac{(W_1 - W_n)}{W} \tau) \pm \Delta t. \quad (8)$$

Спосіб оптимального послідовного енергетичного виявлення радіосигналів реалізується за допомогою алгоритму оптимального енергетичного виявлення радіосигналів на основі перевірки статистичних гіпотез за критерієм мінімуму середнього ризику з використанням енергетичного відношення правдоподібності, що зображений на рис. 7, [6].

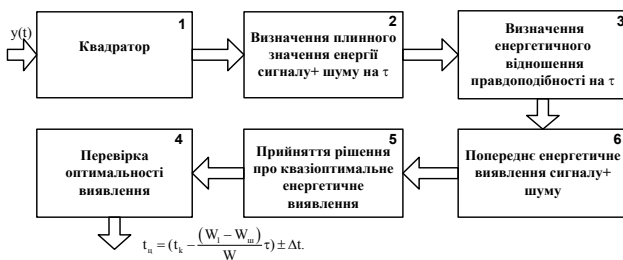


Рис. 7. Алгоритм оптимального послідовного енергетичного виявлення радіосигналів

Паралельне (багатоканальне) виявлення. Недоліком одноканального способу енергетичного виявлення радіосигналів є те, що він не забезпечує рівномірну чутливість приймача до енергетики

радіосигналів на інтервалі періоду слідування зондуючого сигналу унаслідок випадкового розташування радіосигналу щодо інтервалу аналізу. Це видно з кривих виявлення радіосигналу (рис. 3) для випадку збігу інтервалу аналізу з радіосигналом й у разі збігу інтервалу аналізу з половиною радіосигналу, коли енергія сигналу ділиться між двома інтервалами аналізу.

Способом стабілізації чутливості радіоприймача при енергетичному виявленні радіосигналів і випадковому їхньому розташуванні щодо часового інтервалу аналізу, який наблизить криві виявлення якнайгіршого випадку до ідеального, тобто зробить чутливість радіоприймача однаково якнайкращою за період проходження зондуючих сигналів, є багатоканальне в часі виявлення й оцінювання часу затримки радіосигналу, як зазначено в роботі [7].

Задача вирішується за рахунок того, що з використанням критерію мінімуму середнього ризику в разі виявлення енергії суми радіосигналів і внутрішніх шумів радіоприймача на інтервалі аналізу, що дорівнює тривалості радіосигналу, застосовується обробка радіосигналів у N каналах, які максимально зсунуті в часі на $\frac{n\Delta t}{2}$ із затримкою в кожному з них на $m\Delta t$, де Δt – інтервал дискретизації; n – кількість оцифрованих вибірок за тривалість радіоімпульсу. Ухвалення рішення про квазіоптимальне виявлення радіосигналу здійснюється після аналізу енергетичних відношень правдоподібності на виході часових каналів виявлення за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності

$$\max_{0-\infty} \frac{(W_s + W_n)|_{\tau_i}}{W_n|_{\tau_{i-2}}} \geq L_0. \quad (9)$$

Спосіб оптимального паралельного енергетичного виявлення радіосигналів реалізується за допомогою алгоритму енергетичного виявлення суми енергій радіосигналу й шуму, що зображений на рис. 8.

Суть багатоканального в часі енергетичного виявлення радіосигналів способу, який запропоновано, полягає в сумарному зсуві вхідної реалізації у N каналах на час, рівний половині тривалості радіоімпульсу, розбитті періоду проходження радіосигналів T в кожному часовому каналі на інтервали часу, рівні тривалості очікуваного сигналу τ , й вимірі енергії суміші сигналу та шуму в кожному з них. Набуті значення енергій є джерелом для

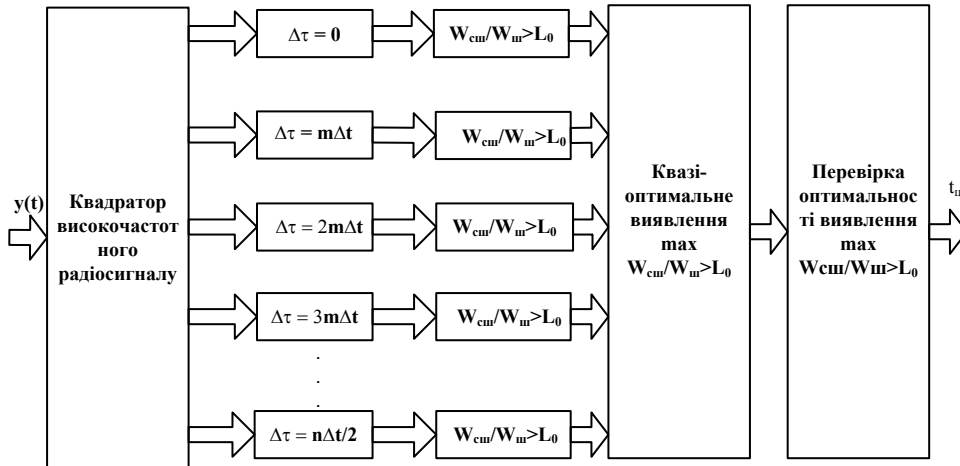


Рис.8. Алгоритм багатоканального оптимального енергетичного виявлення суми енергій радіосигналу й шуму

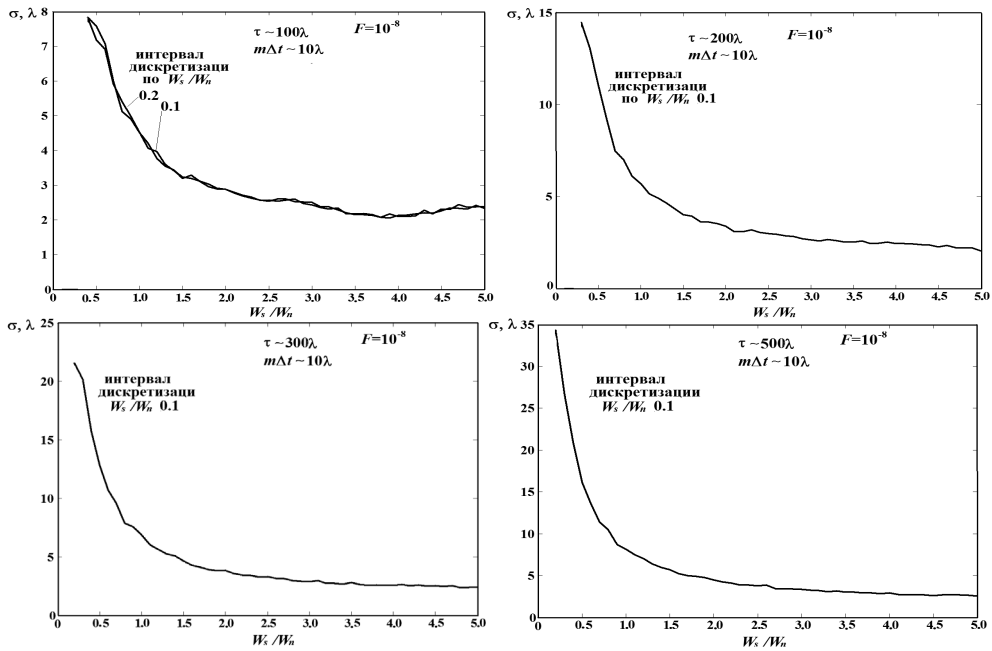


Рис. 9. Залежності середньквдратичної помилки визначення дальності до цілі від енергетичного відношення сигнал/шум у разі різних τ

визначення послідовності енергетичних відношень правдоподібності. Енергетичні відношення правдоподібності перших інтервалів аналізу визначаються як відношення оцінки енергії поточного інтервалу аналізу до усередненої енергії шуму за попередні періоди проходження зондуючих сигналів. У цьому разі процес енергетичного виявлення дозволяє вирішити щодо можливості квазіоптимального виявлення за енергетикою на підставі аналізу енергетичних відношень правдоподібності

в кожному часовому каналі й знаходження каналу з їхнім максимальним значенням (9).

Завершальне прийняття рішення про оптимальне енергетичне виявлення здійснюється шляхом пошуку максимального значення енергетичного відношення правдоподібності при послідовній зміні інтервалу аналізу на крок у діапазоні $\pm \Delta t$ щодо квазіоптимального пропорційному діапазону можливих флуктуацій енергії внутрішнього шуму приймача щодо його усередненої енергії.

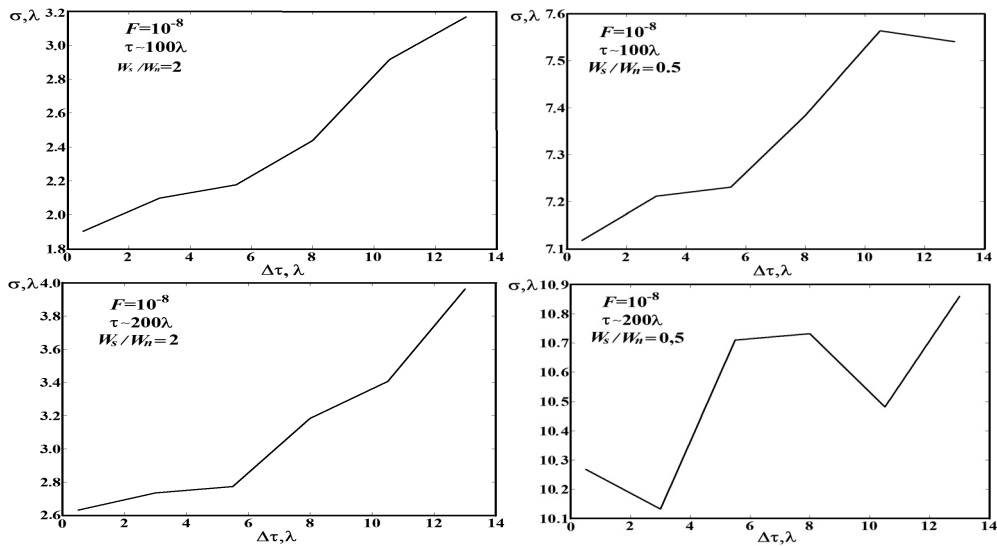


Рис. 10. Залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі від величини затримки між часовими каналами виявлення при τ відповідному 100λ і 200λ та відношеннях $W_s/W_n = 2$; $W_s/W_n = 0,5$

8. Дослідження багатоканального виявляча радіосигналів

Дослідженню підлягав алгоритм, аналогом якого є багатоканальний виявляч із затримкою сигналу в кожному каналі на $m\Delta t \quad \forall m \in 1 \dots n/2$. У кожному каналі оцінюється енергія сигналу на інтервалі, рівному тривалості радіосигналу, й знаходиться відношення оцінки енергії поточного інтервалу аналізу до усередненої енергії шуму за попередній період проходження зонduючих сигналів, а наступні – як відношення поточної енергії до усередненої енергії шуму ($i-2$) інтервалу аналізу. Прийняття рішення про виявлення радіосигналу приймається за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності. Попередні результати моделювання показані на рис. 9 і 10.

На рис. 9 зображено залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі в довжинах хвиль зонduючого сигналу в разі тривалості радіосигналів $\tau \sim 100\lambda$; 200λ ; 300λ ; 500λ при ймовірності хибних тривог 10^{-8} і затримці обробки інформації між часовими каналами виявлення $\Delta\tau$: 10λ у разі аналого-цифрового моделювання й усереднення 1000 реалізацій на кожену точку від енергетичного відношення сигнал/шум.

Із аналізу графіків на рис. 9 видно, що середньоквадратична помилка визначення інтервалу часу знаходження сумарної енергії сигналу й шуму істотно залежить від відношення енергії сигналу до енергії шуму й змінюється від 8λ до $2,5\lambda$ у разі зміни W_s/W_n в межах $0,5 \dots 5$ при тривалості

радіосигналу 100λ і затримці обробки інформації між часовими каналами виявлення τ : 10λ . Із збільшенням тривалості радіосигналу від 100λ до 500λ за умови малих відношень енергії сигналу до енергії шуму ($0,5$) середньоквадратична помилка оцінки дальності до цілі зростає від 8λ до 35λ . За умови відношення енергії сигналу до енергії шуму $W_s/W_n = 5$ помилка визначення дальності від тривалості радіосигналу не залежить і складає $2,5\lambda$.

На рис. 10 показані графіки залежності середньоквадратичної помилки визначення дальності до цілі в довжинах хвиль зонduючого сигналу в разі тривалості радіосигналів $\tau \square 100\lambda$, 200λ і відношеннях енергії радіосигналу до енергії шуму $W_s/W_n = 2$, $W_s/W_n = 0,5$ за умови ймовірності хибних тривог 10^{-8} , аналого-цифровому моделюванні й усередненні 1000 реалізацій на кожену точку від величини затримки обробки інформації між часовими каналами виявлення.

З аналізу графіків на рис. 10 видно, що середньоквадратична помилка визначення інтервалу часу знаходження сумарної енергії сигналу й шуму істотно залежить від відношення енергії сигналу до енергії шуму й змінюється приблизно на λ у разі зміни затримки між часовими каналами виявлення від λ до 10λ .

9. Функція непогодження (неоднозначності, невизначеності) радіосигналів

Непогодження параметрів когерентних сигналів оцінюється за вихідним ефектом засобу обробки радіосигналів. Вихідний ефект класичної системи обробки – це модуль кореляційного інтеграла

$|Z(\alpha_c, \alpha)| = \Psi(\alpha_c, \alpha)$. Останній вважають оптимізованим для очікуваного сигналу на тлі некорельованих стаціонарних внутрішніх шумів радіоприймача з фіксованою щільністю потужності. Сукупний векторний параметр сигналу непогоджений відносно очікуваного параметра α , що істотно при виявленні, вимірі й розрізненні. Прийнятий сигнал $Y(t) = X(t, \alpha_c)$ вважають без впливу додаткових перешкод, але зі значенням непогодженого параметра α_τ . Функція непогодження

$$\Psi(\alpha_c, \alpha) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} X^T(t, \alpha_c) X^*(t, \alpha) dt \right|$$

Нормована функція непогодження

$$\rho(\alpha_c, \alpha) = \Psi(\alpha_c, \alpha) / \sqrt{\Psi(\alpha_c, \alpha_c) \Psi(\alpha, \alpha)}$$

В енергетичній теорії виявлення вихідний ефект процесу обробки сигналів – це визначення поточного енергетичного відношення правдоподібності суми радіосигналу й шуму до усередненої енергії шуму за декілька попередніх інтервалів аналізу, рівних тривалості радіосигналу, й порівняння з порогом виявлення.

У цьому разі функція непогодження залежить від одного параметра τ , що фізично означає ступінь відхилення показника, який визначається, енергетичного відношення правдоподібності від інтервалу аналізу. Нормована функція непогодження – це відношення модуля кореляційного інтеграла між енергетичним відношенням правдоподібності й функцією аналізу в часі до модуля узгодженого в часі енергетичного відношення правдоподібності:

$$\rho_E(\tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} L(t-\tau) A^*(t) dt \right| / |L(t)|$$

де $A^*(t)$ – положення оптимальної функції аналізу в часі,

$$A^*(t) = \begin{cases} 1 & t = \tau_c; \\ 0 & t > \tau_c. \end{cases}$$

$L(t-\tau)$ – непогоджене енергетичне відношення правдоподібності в часі; $L(t)$ – узгоджене в часі енергетичне відношення правдоподібності.

На рис. 11 зображена нормована функція непогодження з метою виявлення суми енергій радіосигналу й шуму.

На рис. 11,а зображено функцію непогодження для одного інтервалу аналізу. У разі послідовного виявлення функція непогодження має вигляд, показаний на рис. 11,б, а в разі багатоканального виявлення – на рис. 11,с.

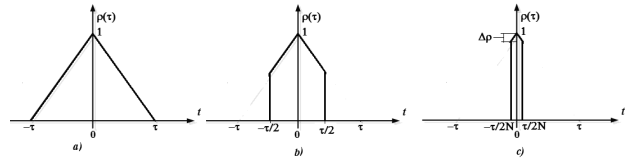


Рис. 11. Нормована функція непогодження з метою виявлення енергії суми радіосигналу й шуму

У разі енергетичного послідовного виявлення потрапляння радіосигналу на два інтервали аналізу, тобто коли енергія радіосигналу порівню ділиться між двома інтервалами аналізу – це якнайгірший випадок, який вірогідний. Цей недолік усувається шляхом використання багатоканального виявляча. Незбіг радіосигналу з інтервалом аналізу веде до енергетичних втрат. Максимальні відносні енергетичні втрати $\Delta\rho$ у разі виявлення визначаються величиною поточних енергетичних флуктуацій шуму щодо його усередненої енергії на інтервалі статистичного аналізу й залежать від тривалості радіоімпульсу. Ширина піка функції непогодження з метою багатоканального виявлення визначається інтервалом дискретизації затримок між каналами $\Delta\tau = \tau / N$, де N – число каналів обробки інформації.

З метою енергетичного виявлення в широкій смузі засобу АЦП значення доплерівської частоти й форми радіосигналу не впливають на оптимальне виявлення сумарної енергії сигналу й шуму, що важливо для оптимального виявлення в разі апріорної невизначеності форми й несучої частоти радіосигналу.

10. Енергетичне виявлення радіосигналів ПРИ впливі активних шумових перешкод

Розпізнавання впливу маскуючих шумових перешкод можливе за рахунок запам'ятовування значення рівня власних шумів попередніх вимірів W_n при апріорній відсутності активних перешкод, що видно з аналізу енергетичного відношення правдоподібності згідно з [8]

$$\max_{0-O} \frac{(W_s + W_n + W_{ai})|_{\tau_i}}{W_n|_{\tau_{i-2}}} \geq L_0, \quad (10)$$

де W_{ai} – абсолютний енергетичний рівень активної перешкоди; W_s – енергетичний рівень радіосигналу; W_n – енергетичний рівень внутрішнього шуму.

Поріг енергетичного виявлення активної маскуючої перешкоди L_0 визначається за рівнянням (5) і має значення (6).

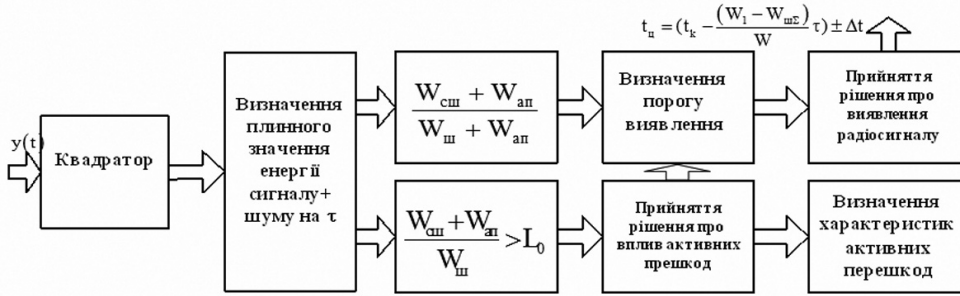


Рис. 12. Загальна схема способу енергетичного виявлення радіосигналів за умови впливу активних маскуючих перешкод

За відсутності сигналу енергетичне відношення правдоподібності показує відносний рівень активної перешкоди. Тривалість дії активної перешкоди визначається кількістю інтервалів, де сталося перевищення порога виявлення.

Чутливість критерію до виявлення сигналу на фоні активних маскуючих перешкод визначається за таким енергетичного відношення правдоподібності:

$$\max_{0-\infty} \frac{(W_{sn} + W_{ai} + \Delta W)|_{\tau_i}}{(W_n + W_{ai})|_{\tau_{i-2}}} > L_1. \quad (11)$$

Виявлення початку інтервалу розташування сумарної енергії сигналу, активної маскуючої перешкоди й внутрішнього шуму здійснюється за методикою, аналогічною виявленню сумарної енергії активної маскуючої перешкоди й внутрішнього шуму приймача. У разі послідовного виявлення у виразі (7) для t_{σ} значення W_i – значення енергії суміші сигналу, активної маскуючої перешкоди й шуму в i -му інтервалі аналізу; $W = (W_1 - W_{n\Sigma}) + (W_2 - W_{n\Sigma})$ – значення енергії сигналу при оптимальному енергетичному виявленні; $(W_1 - W_{n\Sigma})$, $(W_2 - W_{n\Sigma})$ – рівні енергії радіосигналу в першому та другому інтервалах аналізу; $W_{n\Sigma} = W_n + W_{ai}$ – рівень енергії гаусівських внутрішніх шумів й активної маскуючої перешкоди; ΔW – рівень флуктуацій поточного значення енергії шуму відносно її усередненого значення; L_1 – поріг енергетичного виявлення радіосигналу, в разі дії активної маскуючої перешкоди визначається з рівняння (5) і має значення (6) з урахуванням сумарної дисперсії гаусівських внутрішніх шумів й активної маскуючої перешкоди.

На рис. 12 показано загальну схему способу енергетичного виявлення радіосигналів за умови впливу активних маскуючих перешкод на основі перевірки статистичних гіпотез за критерієм мінімуму середнього ризику з використанням різних енергетичних відношень правдоподібності (10), (11).

На рис. 13 подано ілюстрацію способу енергетичного виявлення радіосигналу на фоні активної маскуючої перешкоди (рис. 13,а), що за енергетикою в 2 рази перевищує рівень власних шумів, без врахування флуктуацій поточного значення енергії суми радіосигналу, власних шумів і перешкод щодо усередненого рівня енергії суми власних шумів і перешкод (рис. 13,б).

Результати дослідження стійкості енергетичного критерію при впливі активних шумових перешкод у разі 10% флуктуаціях енергії внутрішніх шумів показані на рис. 14.

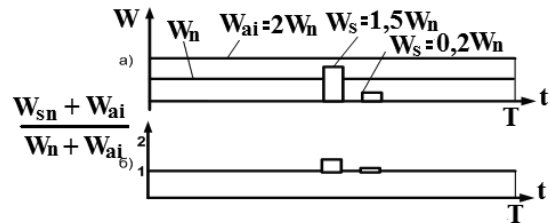


Рис. 13. Ілюстрація енергетичного критерію виявлення радіосигналу на фоні активної маскуючої перешкоди

З рис. 14 видно, що навіть при високих рівнях активних маскуючих перешкод енергетичний критерій є дієздатним і сигнал буде виявлено, якщо перевищить поріг виявлення L_1 . Поріг виявлення радіосигналу L_1 визначається з виразу умовної імовірності хибних тривог (6) з урахуванням сумарної дисперсії гаусівських внутрішніх шумів й активної маскуючої перешкоди.

11. Висновки

Варіант теорії виявлення радіосигналу, який запропоновано, на фоні внутрішнього шуму (енергетичної теорії виявлення) відрізняється самою постановкою завдання: виявляються не амплітуди

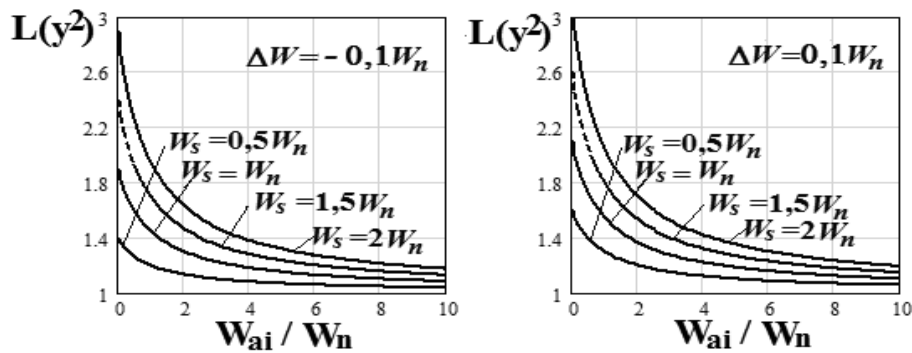


Рис. 14. Результати дослідження стійкості енергетичного критерію у разі впливу активних шумових перешкод

радіосигналів, а інтервали часу, де відносна сумарна енергія сигналу й шуму перевищує поріг виявлення.

Енергетичний підхід дозволяє об'єктивніше описати процес виявлення сигналів з довільним законом розподілу амплітудних флуктуацій при впливі активних маскуючих перешкод і має велике значення з метою практичного застосування як в радіолокації, так і в радіотехніці. Він дозволяє, наприклад, збільшити дальність виявлення в системах радіолокації при тому ж потенціалі в 2...5 разів (або зменшити потенціал мінімум на порядок з метою виконання визначеного завдання).

Використання критерію мінімуму середнього ризику в разі розгляду завдання енергетичного виявлення є простим і достатньо універсальним способом статистичної оптимізації.

Попередні дослідження показали такі недоліки класичної теорії виявлення сигналів та її практичної реалізації для $q \leq 1$.

Відношення правдоподібності не спирається на закон збереження енергії.

Відношення правдоподібності не вимірюється й безпосередньо не використовується як критерій з метою ухвалення рішення про виявлення радіосигналів.

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

Недоліками практичної реалізації теоретичних основ є такі.

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

При виявленні радіосигналів не враховується їхня тривалість, що веде до зростання хибних тривог. Так, хибне виявлення навіть мілісекундних

радіосигналів без врахування їхньої тривалості можливе через будь-які амплітудні викиди випадкового процесу. Стабілізація хибних тривог вимагає високих відношень сигнал/шум і високих порогів виявлення, що веде до великих енергетичних витрат радіопередавальних пристроїв.

Оптимальний фільтр для прямокутного радіосигналу з енергетичного погляду не є оптимальним унаслідок того, що збільшує тривалість радіосигналу в два рази й зменшує енергію радіосигналу в два рази.

Використання наведеного альтернативного варіанта енергетичного виявлення радіосигналів від цілі цифровими РЛС відкриває перспективу побудови нових низкопотенційних радіолокаторів з автоматичним розпізнаванням дії активних маскуючих перешкод, підвищення бойових можливостей існуючих РЛС. Результати досліджень можуть бути узагальнені на радіотехнічні системи, де використовується процес виявлення й оцінювання параметрів радіосигналів на фоні внутрішнього шуму й радіоперешкод.

Список літератури

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы: учебн. для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.
2. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. // Я. Д. Ширман [и др.]; под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО «Маквис», 1998. – 828 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и её инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. – 2-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
4. Теоретичні основи новітніх технологій побудови радіолокаційних систем /

- Певцов Г. В. [та ін.] // Наука і оборона. – 2014. – № 2. – С. 45–53.
5. *Метод* енергетичного виявлення радіосигналів / Певцов Г. В. [та ін.] // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2010. – № 4 (16). – С. 72–76.
 6. *Патент* на корисну модель 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.
 7. *Патент* на корисну модель 64707. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб багатоканального за часом енергетичного виявлення радіосигналів / Г. В. Певцов, А. Я. Яцуценко [та ін.]. – №201106721; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.
 8. *Патент* на корисну модель 64706. Україна, МПК G01S 7/34. Спосіб енергетичного виявлення радіосигналів при впливі активних маскуючих перешкод / Г. В. Певцов, А. Я. Яцуценко [та ін.]. – №201106697; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.
 9. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Клімішен О.О., Остапова А.М. Основи енергетичного виявлення-оцінювання параметрів радіосигналів / Г. В. Певцов [та ін.] // Сб. науч. трудов 4-го Международного радиозлектронного форума (МРФ 2011). – Харьков, 2011. – С. 192–195.
 10. *Pevtsov G. Theoretical Basics of Radar Signals Energy Detection* / Pevtsov G., Yatsutsenko A., Trofimenko Yu., Karlov D., Bortsova M. [Electron recourse]: Proc. of the 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. – Kharkov: KNAME, 2012. – 1 CD-ROM.