

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

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТЕОРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛІВ

Викладаються принципи оцінювання початкової фази і частоти в радіолокаційних системах при використанні енергетичної теорії виявлення-оцінювання. Розглядається узагальнення фазового способу оцінювання параметрів радіосигналів для синтезу вимірювальної системи при енергіях радіосигналів, співвимірних з енергією внутрішніх шумів приймача. Подається метод визначення радіальної складової швидкості в умовах апріорної визначеності несучої частоти радіосигналів. Наводиться узагальнений динамічний алгоритм попередньої класифікації об'єктів за доплерівською частотою.

Ключові слова: енергетичний критерій виявлення радіолокаційних сигналів, радіолокаційна станція (РЛС), багатоканальне за часом енергетичне виявлення цілей, оптимальне енергетичне виявлення, квазіоптимальне й оптимальне енергетичне оцінювання початкової фази і доплерівської частоти, оцінювання початкової фази і частоти радіолокаційних сигналів, динамічний алгоритм попередньої класифікації об'єктів за доплерівською частотою.

Введення

У класичній радіолокації байєсівський безумовний середній ризик помилок вимірювання визначається подвійним інтегралом по векторному простору оцінок і параметрів [1]

$$\bar{r} = M(r) = \iint_{(V_{\hat{\alpha}}, V_{\alpha})} r(\hat{\alpha}, \alpha) p(\hat{\alpha}, \alpha) dV_{\hat{\alpha}} dV_{\alpha}, \quad (1)$$

де $p(\hat{\alpha}, \alpha)$, $dV_{\hat{\alpha}} dV_{\alpha}$ - щільність і диференціал ймовірності для довільної ситуації $\hat{\alpha}, \alpha$; $r(\hat{\alpha}, \alpha)$ - функція вартості помилок вимірювання, що характеризує плату за помилки в указаній ситуації.

Умовний середній ризик – це байєсівський середній ризик після визначення оцінки $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(y)$ в детермінованій залежності від прийнятої реалізації y . У зв'язку з цим диференціал ймовірності $p(\hat{\alpha}, \alpha) dV_{\hat{\alpha}} dV_{\alpha}$ замінюється на $p(y, \alpha) dV_y dV_{\alpha}$, де $p(y, \alpha)$ – щільність ймовірності суміщення двох випадкових багатомірних величин: прийнятої реалізації y і параметра α і визначається $p(y, \alpha) = p(y)p(\alpha|y)$, $p(\alpha|y)$ – апостеріорна щільність ймовірності оцінюваного параметра α за прийнятою реалізацією y .

Безумовний середній ризик

$$\bar{r} = \int_{(V_y)} r(\hat{\alpha}(y)) p(y) dV_y$$

виражається через умовний середній ризик

$$r(\hat{\alpha}(y)) = \int_{(V_{\alpha})} r(\hat{\alpha}, \alpha) p(\alpha|y) dV_{\alpha}. \quad (2)$$

Мінімізація середнього ризику зводиться до мінімізації умовного середнього ризику для кожної реалізації y шляхом підбору оцінки $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(y)$ для заданої функції вартості $r(\hat{\alpha}, \alpha)$ і апостеріорної щільності ймовірності оцінюваного параметра α $p(\alpha|y)$ за прийнятою реалізацією y .

Апостеріорна щільність ймовірності визначається через апріорну щільність ймовірності $p(\alpha)$ і щільність ймовірності реалізації y при умові α $p(y|\alpha)$. Сумісна щільність ймовірності $p(y, \alpha) = p(\alpha)p(y|\alpha)$. Умовна щільність ймовірності $p(\alpha|y) = k_0 p(\alpha)p(y|\alpha)$ (рис. 1).

$$k_0 = \frac{1}{p(y)} = \frac{1}{\int_{V_{\alpha}} p(\alpha)p(y|\alpha) dV_{\alpha}},$$

що задовольняє умові нормування

$$k_0 \int_{V_{\alpha}} p(\alpha)p(y|\alpha) dV_{\alpha} = 1.$$

При відсутності апріорних даних $p(\alpha) = \text{const}$ крива апостеріорної щільності ймовірності збігається з кривою функції правдоподібності.

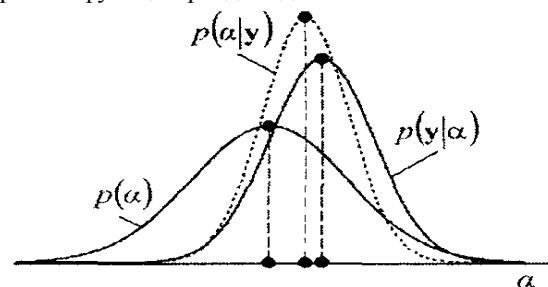


Рис. 1. Розподіл апріорних і апостеріорних щільностей ймовірності випадкових величин

Функції вартості

Квадратична функція вартості векторного параметра α з позитивно визначеною матрицею \mathbf{B}

$$r(\alpha, \hat{\alpha}) = (\hat{\alpha} - \alpha)^T \mathbf{B} (\hat{\alpha} - \alpha). \quad (3)$$

Проста функція вартості

$$r(\hat{\alpha}, \alpha) = -\delta(\hat{\alpha} - \alpha) = \text{const}. \quad (4)$$

Критерії ефективності для квадратичної функції вартості:

- мінімум середнього квадрату помилки в скалярному випадку;

- мінімум середнього значення квадратичної форми помилки у векторному випадку (мінімум середньої суми квадратів помилок при $\mathbf{B}=\mathbf{I}$).

Критерій ефективності для простої функції вартості є мінімум $-p(\alpha|y)$, тобто максимум апостеріорної щільності ймовірності в точці $\hat{\alpha} = \alpha$.

Існуюча теорія оцінювання базується на амплітудному методі обробки інформації і прийнятті рішення за результатами обробки амплітуд сигналів, що можливо при амплітудному відношенні сигнал/шум $q \gg 1$.

Необхідна перевірка можливостей створення теорії оцінювання при використанні енергетичного критерію прийняття рішення про оцінювання параметрів радіосигналів за енергетикою співвимірних з енергетикою внутрішніх шумів.

Мета статті – розробка принципів побудови енергетичної теорії оцінювання параметрів радіосигналів за енергією менших або співвимірних з внутрішніми шумами приймача при плинній статистичній обробці інформації, що дозволить зменшити енергетичні витрати на процес оцінювання.

Постановка задачі та виклад матеріалів дослідження

В основу теорії вимірювання параметрів радіосигналів при енергетичному підході, як і в класичному випадку, положена мінімізація умовного середнього ризику для кожної реалізації y шляхом підбору оцінки $\hat{\alpha} = \hat{\alpha}(y^2)$ при заданих функціях вартості і використанні апостеріорного енергетичного відношення правдоподібності як вимірювального інструменту.

Можливі два підходи до створення теорії енергетичного оцінювання:

синтез вимірювальних систем на основі класичної радіолокації з використанням контролю якості і прийняття рішення за енергетичним відношенням правдоподібності;

синтез вимірювальних систем тільки на основі енергетичного відношення правдоподібності.

Регулярна оцінка максимуму апостеріорної щільності ймовірності суми енергій сигналу і шуму знаходиться із умови

$$\frac{\partial p(\alpha / y^2)}{\partial \alpha_i} = 0 \text{ при } \alpha = \hat{\alpha}, \quad (5)$$

де $i = 1, 2, \dots, m$ і збігається з оцінкою апостеріорного математичного очікування. При відсутності апріорних даних $p(\alpha) = \text{const}$ щільність ймовірності $p(\alpha / y^2)$ замінюється на функцію енергетичної правдоподібності $p(y^2 / \alpha)$, енергетичне відношення правдоподібності $L(\alpha / y^2)$ або на $\ln L(y^2 / \alpha)$. Це призводить до умови максимуму відношення енергетичної

правдоподібності $\frac{\partial p(y^2 / \alpha)}{\partial \alpha_i} = 0$ при $\alpha = \hat{\alpha}$, або до

$$\frac{\partial L(y^2 / \alpha)}{\partial \alpha_i} = 0 \text{ при } \alpha = \hat{\alpha}, \text{ що означає - після}$$

прийняття реалізації y при відсутності апріорних даних регулярна оптимальна оцінка $\hat{\alpha}$ знаходиться із умови максимуму енергетичного відношення правдоподібності на виході приймача виявлення при використанні множини можливих значень α еталонних (очікуваних) сигналів. На відміну від класичної теорії оцінювання використання енергетичного відношення правдоподібності дозволяє оцінити значення параметрів радіосигналів за енергетикою менших за рівень внутрішніх шумів.

Перевірка можливості синтезу вимірювальних систем на основі енергетичного відношення правдоподібності

Задум вимірювання параметрів слабких радіосигналів полягає у виявленні радіосигналу (визначенні інтервалу часу, де знаходиться радіосигнал, та визначенні його абсолютної величини енергії відносно усередненого рівня внутрішніх шумів) [2...5], складанні або перемноженні оцифрованих вибірок суміші радіосигналів і шуму з множиною еталонних сигналів (кореляційна обробка радіосигналів), що сформовані на основі апріорних даних або вимірювання їх, 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) при використанні когерентних властивостей радіосигналів.

Метод синтезу оптимальних систем приймання радіосигналів ґрунтується на критерії мінімуму середнього ризику при використанні максимуму енергетичного відношення правдоподібності.

Виявлення радіосигналів в енергетичній теорії здійснюється шляхом порівняння максимуму енергетичного відношення правдоподібності суми енергій вхідного радіосигналу і шуму до усередненої енергії внутрішнього шуму з порогом виявлення, що визначається з виразу умовної ймовірності хибних тривог для моделі χ^2 – розподілу суми квадратів амплітуд шумових вибірок для гаусівської моделі флуктуацій внутрішніх шумів [2...5].

Вимірювання (оцінка) параметрів виявленого радіосигналу здійснюється шляхом визначення абсолютного максимуму енергетичного відношення правдоподібності суми (добутку) вхідного радіосигналу, шуму і змінного за параметрами еталонного радіосигналу для простої функції втрат (в теоретичному плані – максимуму функціоналу енергетичного відношення правдоподібності як відношення щільності ймовірності розподілу енергій суми (добутку) радіосигналу та шуму і еталонного радіосигналу на інтервалі зміни його параметрів до щільності ймовірності розподілу енергій внутрішнього шуму).

Байєсівський підхід до синтезу оптимальної приймальної системи вимагає урахування усіх апріорних відомостей про параметри радіосигналів і основних завдань РЛС.

Із класичної теорії радіолокації відома висока точність фазових методів оцінювання координат при усуненні неоднозначності оцінювання.

Дослідженню підлягала можливість використання фазового методу в енергетичній теорії виявлення-оцінювання параметрів радіосигналів за енергетикою менших або співвимірних з внутрішніми шумами.

Загальна схема методу оцінки доплерівської частоти і початкової фази когерентних немодульованих радіосигналів в енергетичній теорії виявлення-оцінювання при використанні еталонних радіосигналів подана на рис. 2. Метод базується на пошуку максимального енергетичного відношення правдоподібності при складанні виявленої вибірки

суміші радіосигналу і шуму з сукупністю еталонних радіосигналів із змінними початковими фазами і доплерівськими частотами на множині їх можливих значень. Для зменшення часових витрат пропонується двохетапне оцінювання з різною дискретизацією еталонних радіосигналів – квазіоптимальне та оптимальне оцінювання.

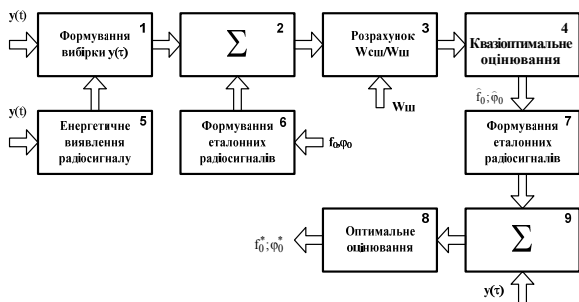


Рис. 2. Загальна схема методу оцінки початкової фази і доплерівської частоти радіосигналів в енергетичній теорії виявлення-оцінювання

З метою оцінки можливостей використання фазового методу в енергетичній теорії виявлення-оцінювання дослідженню підлягала детермінована модель суми вхідного немодульованого $a \cdot \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 1})t + \varphi_1))$ і еталонного радіосигналів $b \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 2})t + \varphi_2))$ на частоті $f = 2 \cdot 10^7$ Гц для різних тривалостей радіосигналів $T = 10^{-5}, \dots, 10^{-3}$; с при $a=b=1$:

$$y_i(t) = a \cdot \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 1})T + \varphi_1)) + b \cdot \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 2})T + \varphi_2)).$$

Енергія сумарного радіосигналу детермінованої моделі без урахування внутрішнього шуму має вигляд:

$$W_{\Sigma}(y(t)) = \left[\sum_{i=1}^n a_i \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 1})T + \varphi_1)) + b_i \sin((2\pi(f + \Delta f_{\delta 2})T + \varphi_2)) \right]^2.$$

Залежність енергії сумарного радіосигналу від аеродинамічної цілі з виходу суматора при послідовному оцінюванні доплерівської частоти подано при тривалості радіосигналу $\tau = 10^{-4}$ с на рис. 3. На графік виводилося дев'ять значень енергії сумарного радіосигналу для дев'яти еталонних радіосигналів в діапазоні зміни $\mp 10^4$ Гц з кроком зміни доплерівської частоти 5 Гц. Доплерівська частота вхідного радіосигналу становила 0 Гц. Квазіоптимальна оцінка частоти складала 90 Гц.

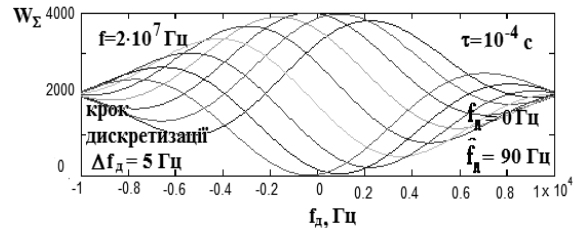


Рис.3. Залежність енергії сумарного радіосигналу від доплерівської частоти аеродинамічної цілі з виходу суматора при послідовному оцінюванні

Залежність енергії сумарного радіосигналу від аеродинамічної цілі з виходу суматора при оцінюванні початкової фази надана на рис. 4. На графік виводилося дев'ять значень енергії сумарного радіосигналу для дев'яти еталонних радіосигналів у діапазоні зміни початкової фази $[0...360^0]$. Початкова фаза вхідного радіосигналу для доплерівської частоти 0 Гц задавалася 77^0 . Квазіоптимальна оцінка початкової фази складала 75^0 при кроці дискретизації еталонного радіосигналу 5^0 .

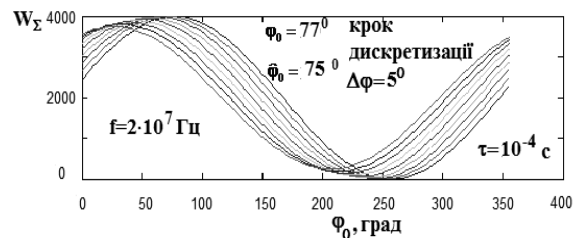


Рис. 4. Залежність енергії сумарного радіосигналу від початкової фази з виходу суматора при квазіоптимальному оцінюванні

Залежність енергії сумарного радіосигналу від аеродинамічної цілі з виходу суматора при послідовному оцінюванні доплерівської частоти при тривалості радіосигналу $\tau = 10^{-3}$ с надана на рис. 5.

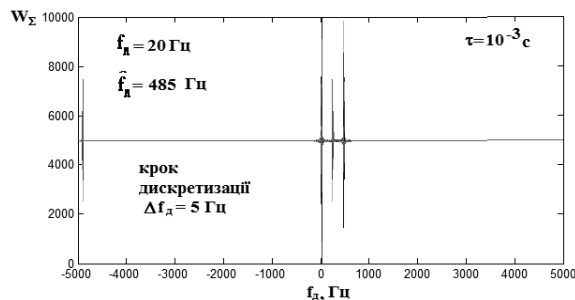


Рис. 5. Залежність енергії сумарного радіосигналу від доплерівської частоти аеродинамічної цілі з виходу суматора при квазіоптимальному оцінюванні

Доплерівська частота вхідного радіосигналу становила 20 Гц. Квазіоптимальна оцінка частоти складала 485 Гц. Значна помилка оцінювання доплерівської частоти визначається неоднозначністю частотно-фазової характеристики приймача при обробці тривалих радіосигналів.

Залежність енергії сумарного радіосигналу від аеродинамічної цілі з виходу суматора від початкової фази надана на рис.6. На графік виводилося дев'ять значень енергії сумарного радіосигналу для дев'яти еталонних радіосигналів в діапазоні зміни початкової фази $[0...360^0]$. Початкова фаза вхідного радіосигналу для доплерівської частоти 1345 Гц задавалася 20^0 . Квазіоптимальна оцінка початкової фази складала 160^0 при кроці дискретизації 5^0 .

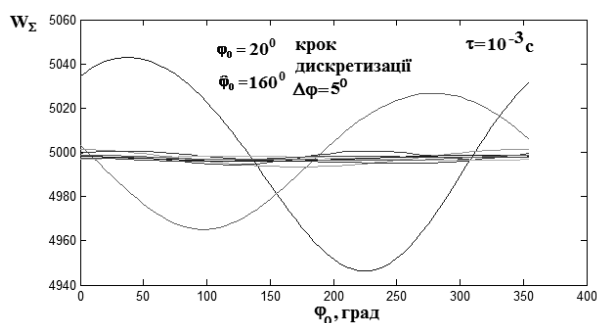


Рис. 6. Залежність енергії сумарного радіосигналу від початкової фази з виходу суматора

Із аналізу рис. 3–6 слідує, що похибки оцінювання доплерівської частоти залежать від кроку дискретизації еталонних радіосигналів та тривалості радіосигналів. При тривалих радіосигналах (рис. 5–6) виникає неоднозначність оцінювання, що видно із рис. 9.

Графік залежності максимальної помилки (потенційної точності) визначення доплерівської частоти радіосигналу від його тривалості за максимумом сумарної енергії для кореляційного способу обробки інформації наданий на рис. 7.

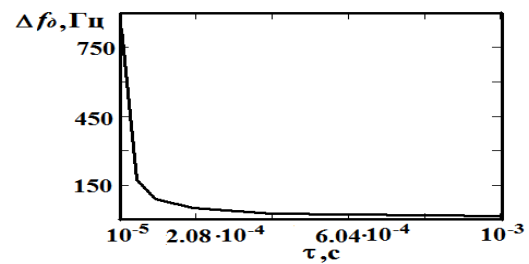


Рис. 7. Потенційна точність визначення доплерівської частоти від тривалості радіосигналу при використанні енергетичного критерію і кореляційному способі обробки інформації

Помилка визначення початкової фази вхідного когерентного радіосигналу від тривалості радіосигналу не залежить, а залежить від інтервалу дискретизації еталонного радіосигналу.

Із попередніх досліджень слідує, що для однозначного оцінювання початкової фази і доплерівської частоти тривалих радіосигналів необхідно обирати такі вибірки із них, щоб забезпечити задані помилки та усунути неоднозначність оцінювання.

При цифровій обробці інформації для оцінювання доплерівської частоти короткого радіосигналу із заданими помилками необхідно створювати псевдопачку із виявленого радіосигналу шляхом зімкнення його повторень до необхідної тривалості, при якій забезпечується однозначність оцінювання (рис. 8).

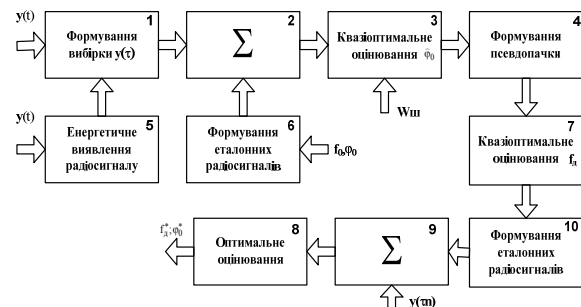


Рис.8. Спосіб оцінки початкової фази і доплерівської частоти коротких радіосигналів в енергетичній теорії виявлення-оцінювання

Дослідження можливості оцінювання доплерівської частоти і початкової фази тривалих радіосигналів

У теперішній час проведення швидкоплинних повітряних операцій постає питання скорочення часу спостереження радіолокаційними засобами повітряних і космічних цілей. Це можливо при моноімпульсному способі високоточного вимірювання параметрів радіосигналів та повного вектора швидкості цілі в багатопозиційних наземних або орбітальних радіолокаційних системах.

З метою оцінки можливостей використання фазового методу в енергетичній теорії виявлення-оцінювання для кореляційного способу обробки тривалих радіосигналів дослідженню підлягала детермінована модель суми вхідного гармонічного $\alpha_s \cdot \cos((2\pi(f + \Delta f_{DS})t + \varphi_s))$ і еталонного радіосигналів

$b_{ef} \cdot \cos((2\pi(f)T + \varphi_{ef}))$ на частоті $f = 2 \cdot 10^8$ Гц та еквівалентної амплітуди шуму $n_{екв}$, визначеної із усередненої енергії шуму, для різних тривалостей радіосигналів $T=10^{-3}; 10^{-4}; 10^{-6}$ с

$$y_1(t) = a_s \cdot \cos((2\pi(f + \Delta f_{доп})T + \varphi_s) + n_{екв} + b_{ef} \cos((2\pi(f)T + \varphi_{ef}))$$

Енергетичне відношення правдоподібності детермінованої моделі має вигляд

$$L(y(t)) = \frac{[a_s \cdot \cos((2\pi(f + \Delta f_{доп})T + \varphi_s) + n_{екв} + b_{ef} \cos((2\pi(f)T + \varphi_{ef})))]^2}{(n_{екв})^2}$$

Залежність доплерівської частоти радіосигналів від модуля вектора швидкості в діапазоні 0...500 км/с надана на рис. 9. Швидкості 500 км/с досягає рухома вздовж міжпланетних силових ліній сонячна плазма.

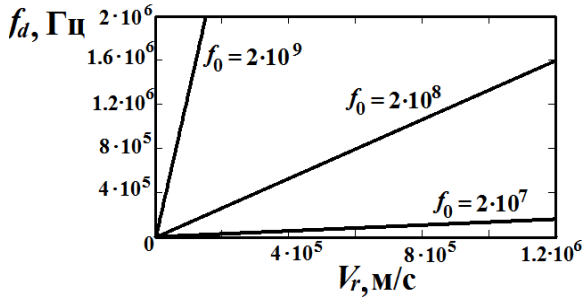


Рис. 9. Залежність доплерівської частоти відбитого радіосигналу від швидкості атакуючої цілі

Спектр доплерівських частот радіосигналів, що відбиваються від рухомих іонізованих утворень метеорних часток ($V=10...80$ км/с), складає відповідно $f_{доп} = 1,333 \cdot 10^4 ... 1,067 \cdot 10^5$ Гц.

Залежність енергетичного відношення правдоподібності при різних тривалостях радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та сигналу, що аналізується в діапазоні ± 30 кГц, надана на рис. 10.

Із аналізу рис. 10 видно, що для однозначного оцінювання доплерівської частоти різних класів об'єктів необхідні різні тривалості радіосигналів, що еквівалентно різним смугам пропускання радіоприймача.

Пропонується синтез приймача на основі енергетичного відношення правдоподібності з тривалістю 10^{-3} с радіосигналом з обробкою його частин для створення різносмугових каналів однозначного оцінювання доплерівських частот.

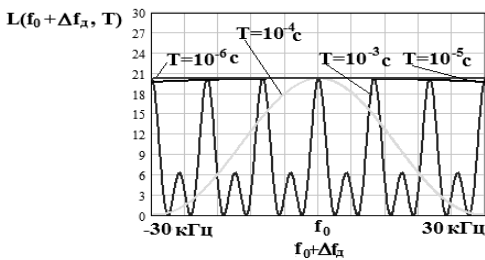


Рис. 10. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від доплерівської частоти в діапазоні ± 30 кГц при різних тривалостях радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та сигналу, що аналізується

Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та вхідного радіосигналу з доплерівськими частотами 0; 100; ∓ 300 Гц для тривалості радіосигналу $T = 10^{-3}$ с надана на рис. 11.

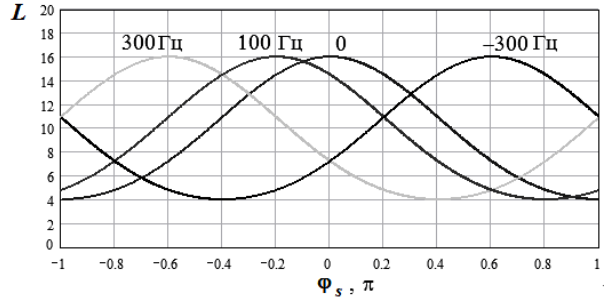


Рис. 11. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та сигналу, що аналізується

Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та сигналу, що аналізується з доплерівськими частотами 0; 800 Гц; ± 12 кГц для тривалості радіосигналу 10^{-4} с надана на рис 12.

Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та сигналу, що аналізується з доплерівськими частотами 0; $-16; 90; 160$ кГц для тривалості радіосигналу $2 \cdot 10^{-6}$ с надана на рис 13.

Із аналізу рис. 10-13 слідує, що при оптимальному виборі тривалості радіосигналів можливе однозначне фазове оцінювання доплерівської частоти класів цілей при рівних початкових фазах відбитого від цілі та еталонного радіосигналів за рахунок різних фазових набігів радіосигналів з різними доплерівськими частотами за ту саму тривалість радіосигналу.

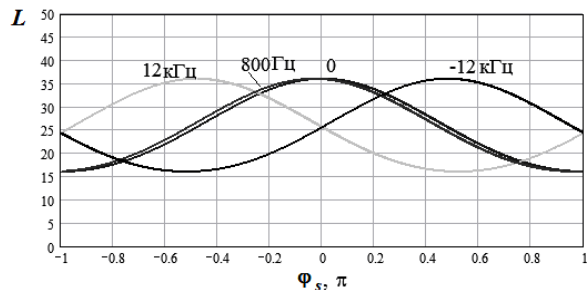


Рис. 12. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та вхідного сигналу з доплерівськими частотами 0; 800 Гц; ± 12 кГц, для тривалості радіосигналу 10^{-4} с

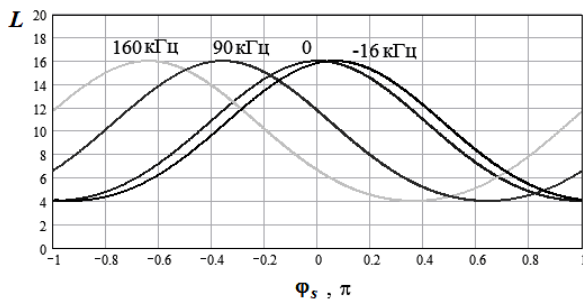


Рис. 13. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та вхідного сигналу з доплерівськими частотами 0; -16; 90; 160 кГц, для тривалості радіосигналу $2 \cdot 10^{-6}$ с

Для оцінювання початкових фаз радіосигналів відбитих від різних відомих об'єктів необхідно використати канал оцінювання за доплерівською частотою, що знаходиться за межами доплерівських частот відомих класів об'єктів. Наприклад, об'єкти, від яких радіосигнали мають доплерівську частоту сотні Герц при аналізі в каналах зі смугою в сотні кілогерц, не чутливі до початкової фази радіосигналів (рис. 14).

Сутність фазового методу оцінювання початкової фази і доплерівської частоти радіосигналів полягає у використанні радіосигналів різної тривалості для досягнення однозначності оцінювання початкової фази і доплерівської частоти для різних класів об'єктів.

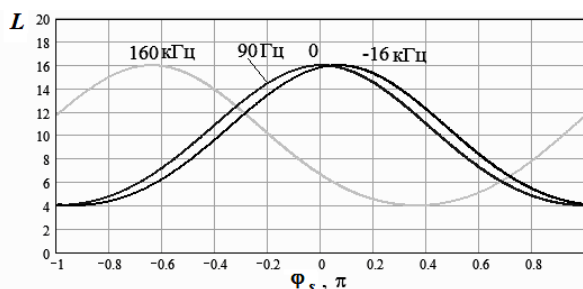


Рис. 14. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від набігу фази за тривалість радіоімпульсу для радіосигналів з різними доплерівськими частотами при рівних початкових фазах еталонного радіосигналу та вхідного радіосигналу з тривалістю $2 \cdot 10^{-6}$ с

Алгоритм оцінювання початкової фази і доплерівської частоти радіосигналу полягає в оцінці початкових фаз у широкосмуговому каналі за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності з подальшим аналізом у вузькосмугових каналах, оптимізованих для однозначного оцінювання доплерівської частоти заданих класів об'єктів.

Залежність енергетичного відношення правдоподібності від початкових фаз прийнятого і еталонного радіосигналів при відсутності частотних зсувів в широкосмуговому каналі надана на рис. 15.

Залежність енергетичного відношення правдоподібності від початкових фаз прийнятого і еталонного радіосигналів при наявності фазового зсуву $-\pi/2$ еталонного радіосигналу надана на рис. 16.

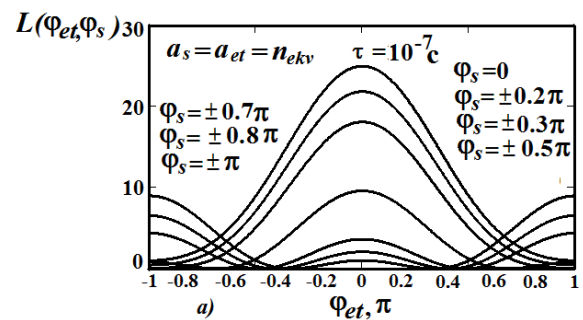


Рис. 15. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від початкових фаз прийнятого та еталонного радіосигналів при відсутності частотних зсувів

Рис. 15 характеризує квадратурний парний радіо-канал з синфазним складанням, а рис. 16 – непарний. Логіка розпізнавання і вирівнювання початкових фаз виявленого та еталонного радіосигналів полягає у наступному. Знак і модуль початкової фази еталонного сигналу визначається номером елемента матриці максимального значення $\|L_j\|$ відносно нульового фазового зрушення еталонного сигналу в квадратурних парному і непарному каналах (рис. 15, 16).

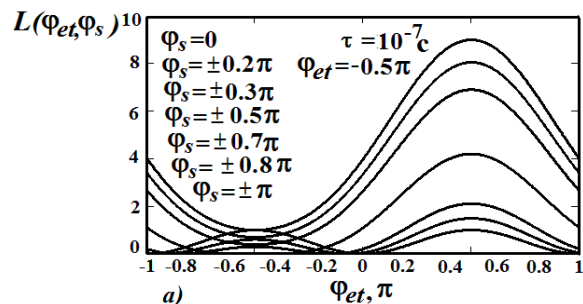


Рис. 16. Залежність енергетичного відношення правдоподібності від початкових фаз прийнятого і еталонного радіосигналів при наявності фазових зсувів

Величина фазового зрушення виявленого радіосигналу пропорційна відношенню різниці значень між максимальним і оціненим енергетичним відношенням правдоподібності до різниці максимального енергетичного відношення правдоподібності при синфазному і протифазному складанні прийнятого і еталонного радіосигналів (рис. 15–16). Залежність енергетичного відношення правдоподібності в квадратурному парному каналі при протифазному складанні еталонного радіосигналу з виявленим подана на рис. 17.

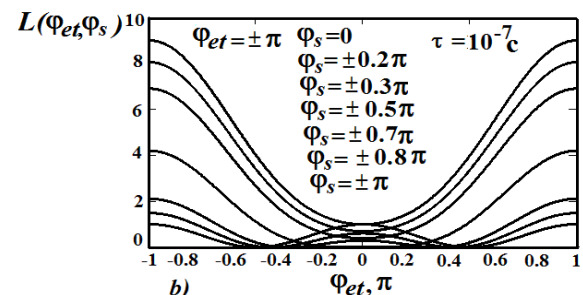


Рис. 17. Залежність енергетичного відношення правдоподібності в квадратурному парному каналі при протифазному складанні еталонного радіосигналу

Основні вимоги до побудови динамічних адаптивних алгоритмів оцінювання радіальних швидкостей цілей за доплерівською частотою радіосигналу визначаються призначенням РЛС, шириною смуги однозначного вимірювання доплерівської частоти за фазовим набігом.

Алгоритм оцінювання початкової фази та доплерівської частоти за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності з класифікацією відбитих радіосигналів від цілей за доплерівською частотою наданий на рис. 18.

Алгоритм включає визначення інтервалу часу, де енергетичне відношення правдоподібності перевищило поріг прийняття рішення про виявлення радіосигналу за критерієм Неймана-Пірсона [2...5].

Оцінювання початкових фаз здійснюється в ширококутовому каналі, нечутливому до доплерівських частот радіосигналу відносно еталонного радіосигналу (рис. 15). При цьому оцінюються значення енергетичного відношення правдоподібності відносно еталонного радіосигналу при відсутності початкової фази.

Вирівнювання початкових фаз прийнятого та апіорі визначених еталонних квадратурно зрушених радіосигналів у радіоканалах оцінювання доплерівської частоти здійснюється за оцінкою модуля фази, пропорційному відношенню різниці енергетичних відношень правдоподібності при синфазному складанні та оптимально оціненому до різниці енергетичних відношень правдоподібності при синфазному і проти-фазному складанні контрольних і еталонних радіосигналів у ширококутовому квадратурному каналі з парним розподілом енергетичного відношення правдоподібності, розрахованому на смугу доплерівських частот об'єктів, що рухаються з великими швидкостями за межею відомих аналогів (рис. 15).

$$\Delta\varphi_0 = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}(\pi)}$$

де L_{\max} - максимальне значення енергетичного відношення правдоподібності при синфазному складанні радіосигналів з оціненими і відомими амплітудами за контрольним радіосигналом;

$L_{\min}(\pi)$ - мінімальне значення енергетичного відношення правдоподібності при проти-фазному складанні радіосигналів з оціненими і відомими амплітудами за контрольним радіосигналом;

L_{\min} - оцінене значення енергетичного відношення правдоподібності при складанні вхідної реалізації з еталонними радіосигналами з оціненими і відомими амплітудами в квадратурному каналі з парним розподілом енергетичного відношення правдоподібності.

Знак і модуль початкової фази еталонного радіосигналу оцінюються за розташуванням максимуму енергетичного відношення правдоподібності в парному квадратурному каналі в залежності від фазових зрушень. За оцінкою початкової фази формуються

еталонні радіосигнали для кожного частотного каналу для квазіоптимального та оптимального оцінювання.

Вибірка суміші сигналу та шуму затримується на величину оціненої початкової фази і розподіляється за тривалістю по декількох часових каналах. В кожному із часових каналів здійснюється фазова затримка виявленого радіосигналу в діапазоні фаз $[-\pi; \pi]$ в N каналах з мінімальною необхідною дискретизацією і складається із еталонними радіосигналами на несучій частоті таких же тривалостей. Квазіоптимальне оцінювання здійснюється шляхом пошуку максимального значення елемента матриці $\|L_j\|$ енергетичних відношень правдоподібності в квадратурному каналі з парним розподілом.

Оптимальне оцінювання здійснюється при меншому кроці фазових зрушень виявленого радіосигналу навколо квазіоптимальної оцінки.

При відповідності фаз радіосигналів енергетичне відношення правдоподібності буде мати максимальне значення, яке визначається за контрольним радіосигналом (рис. 15). Із пропорції значень енергетичних відношень правдоподібності визначається необхідний зсув початкової фази вхідного радіосигналу. Алгоритм оцінювання початкової фази та доплерівської частоти радіосигналу від відомих об'єктів в широкій смузі доплерівських частот за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності подано на рис. 18.

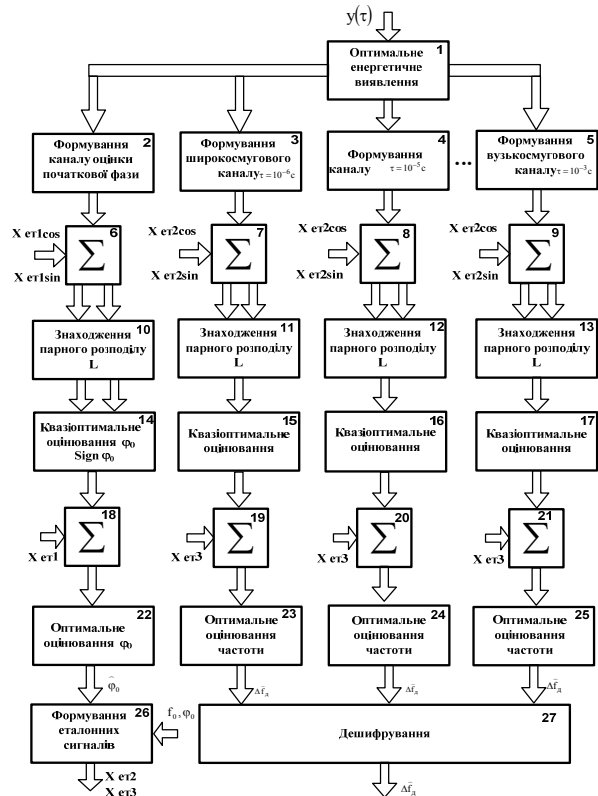


Рис. 18. Алгоритм оцінювання початкової фази та доплерівської частоти тривалого радіосигналу за критерієм максимуму енергетичного відношення правдоподібності

Розподіл максимумів енергетичного відношення правдоподібності на виході каналів оцінювання при $f_d = 777675$ Гц надано на рис. 19.

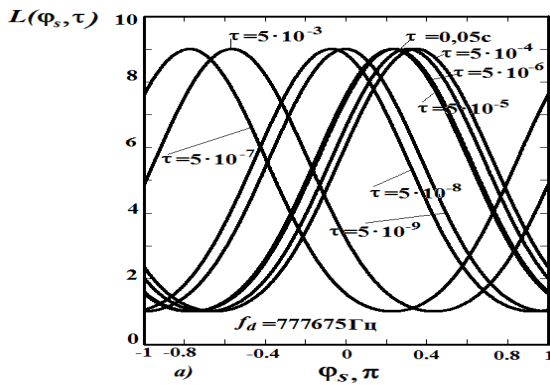


Рис.19. Розподіл максимумів енергетичного відношення правдоподібності на виході каналів оцінювання при $f_d = 777675$ Гц

Розподіл максимумів енергетичного відношення правдоподібності на виході каналів оцінювання при $f_d = -777675$ Гц надано на рис. 20.

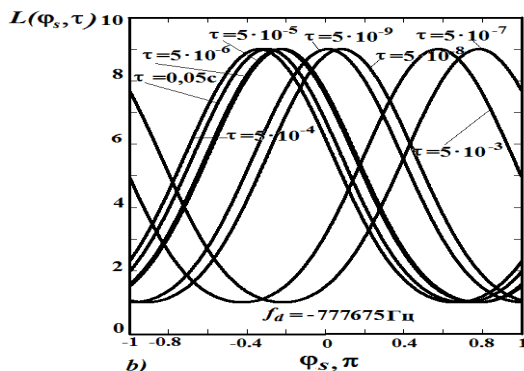


Рис.20. Розподіл максимумів енергетичного відношення правдоподібності на виході каналів оцінювання при $f_d = -777675$ Гц

Дешифратор здійснює формування значення доплерівської частоти на основі розподілів максимумів енергетичного відношення правдоподібності в частотних каналах.

Для настройки динамічного алгоритму використовуються контрольні радіосигнали.

Висновки та напрями подальших досліджень

Попередні дослідження можливості оцінювання доплерівської частоти і початкової фази при кореляційній обробці вхідного радіосигналу і сукупності еталонних радіосигналів при прийнятті рішення за енергетичним відношенням правдоподібності показали можливість використання фазового методу оцінки як коротких співвимірних за енергетикою з внутрішніми шумами радіосигналів, так і тривалих в широкому діапазоні доплерівських частот.

Необхідне подальше дослідження наведених способів оцінки параметрів радіосигналів з перевіркою їх ефективності на практиці.

Використання наведеного варіанта енергетичного оцінювання параметрів радіосигналу від цілі цифровими РЛС відкриває перспективу побудови нових низькопотенційних радіолокаторів з автоматичним попереднім розпізнаванням класів об'єктів за доплерівською частотою, підвищення їх бойових можливостей.

Даний метод оцінювання можливо узагальнити на всі радіотехнічні системи, де є приймачі радіосигналів з оцінюванням параметрів.

Список літератури

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Минервин, С.В. Москвитин, С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Л.С. Левченко / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828 с.
2. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В. Метод енергетичного виявлення радіосигналів // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: – 2010.- №4(16). – С. 72-76.
3. 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.
4. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Клімішен О.О. // Патент на корисну модель 64707. Україна, МПК G01S 7/34. / Спосіб багатоканального за часом енергетичного виявлення радіосигналів; – №201106721; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21.
5. Певцов Г.В., Яцуценко А.Я., Карлов Д.В., Трофименко Ю.В., Челпанов А.В., Шевченко В.І. // Патент на корисну модель 64706. Україна, МПК G01S 7/34. / Спосіб енергетичного виявлення радіосигналів при впливі активних маскуючих перешкод; – №201106697; заявл. 30.05.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл. №21

Рецензент: д.т.н., проф. Л.Ф. Купченко, кафедра Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків.

Принципы построения энергетической теории оценивания параметров радиосигналов

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

Излагаются принципы оценивания начальной фазы и частоты в радиолокационных системах при использовании энергетической теории обнаружения-оценивания. Рассматривается обобщение фазового способа оценивания параметров радиосигналов для синтеза измерительной системы при энергиях радиосигналов, соизмеримых с энергией внутренних шумов приемника. Представляется метод определения радиальной составляющей скорости в условиях априорной определенности несущей частоты радиосигналов. Приводится обобщенный динамический алгоритм предварительной классификации объектов по доплеровской частоте.

Ключевые слова: энергетический критерий обнаружения радиолокационных сигналов, радиолокационная станция (РЛС), многоканальное по времени энергетическое обнаружение целей, оптимальное энергетическое обнаружение, квазиоптимальное и оптимальное энергетическое оценивание начальной фазы и доплеровской частоты, оценивание начальной фазы и частоты радиолокационных сигналов, динамический алгоритм предварительной классификации объектов по доплеровской частоте.

Principles of construction of power theory of radio signals parameters evaluation

G. Pevtsov, A. Yatsutsenko, Yu. Trofymenko, D. Karlov, A. Ostapova

Principles of radar systems initial phase and frequency evaluation using energy theory of detection-evaluation are presented. For synthesis of a measuring system provided that radio signals energies are commensurable with the energy of receiver internal noises a generalization of the phase method for evaluating radio signals parameters is observed. A method of velocity of radial component definition in the conditions of an a priori defined radio signals carrier frequency is given. A generalized dynamic algorithm for preliminary classification of objects using Doppler frequency is suggested.

Keywords: energy criterion for radar signals detection, radiolocation station (RLS), multichannel in time target power detection, optimum power exposure, kvazi optimum and optimum power evaluation of initial phase and Doppler frequency, radar signals initial phase and frequency evaluation, dynamic algorithm for preliminary classification of objects using Doppler frequency.

УДК 623.5

П.П. Ткачук, Ю.В. Шабатура, Р.В. Кузьменко

*Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів***АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ І ОЦІНКА ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ
КООРДИНАТ СНАРЯДІВ ТА МІН НА ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ ПРИ
ЗАСТОСУВАННІ ЦИФРОВОЇ ФОТОРЕЄСТРАЦІЇ**

У роботі проведено аналіз причин виникнення похибок, що зумовлені внутрішніми і зовнішніми чинниками при визначенні координат снарядів та мін на траєкторії польоту. Розроблено математичні моделі з оцінки похибок визначення координат снарядів та мін на траєкторії польоту при стереофото-реєстрації і їх моделі чутливості до зміни вхідних параметрів. Проведено комп'ютерне моделювання відповідними процедурами пакета Maple 5.00.

Ключові слова: фотореєстрація, похибка, координати, траєкторія, снаряд.

Актуальність теми

Відомо, що при траєкторних дослідженнях під час випробування нових зразків артилерійських боеприпасів використовуються оптичні засоби фото-, відеореєстрації [1,2]. Застосування оптичних засобів фото-, відеореєстрації відноситься до галузі фотометричних досліджень [3,4]. Засоби фотореєстрації, що використовуються на сьогоднішній день, нерідко морально та фізично застаріли і використовують аналоговий спосіб реєстрації зображення на фото-,

кіноплівку. Сьогодні впровадження цифрових технологій у повсякденну діяльність набуло широкого розмаху; зокрема під час фотометричних досліджень все частіше застосовують неметричні цифрові фотокамери. Такий підхід дозволяє застосовувати комп'ютерну обробку інформації, що суттєво збільшує оперативність і розширює можливості фотометричного методу, а також дає змогу розглядати можливість створення мобільних пересувних пунктів оптичних траєкторних досліджень.