УДК 621.396.62: 621.396.96

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОНДУВАЛЬНОГО СИГНАЛУ З КВАДРАТИЧНОЮ ВНУТРІШНЬОІМПУЛЬСНОЮ ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Мрачковський О.Д., к.т.н., доцент, Реутська Ю.Ю., асистент
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

ANALYSIS OF POTENTIAL CHARACTERISTICS OF PROBING SIGNAL WITH THE QUADRATIC FREQUENCY MODULATION

Mrachkovsky O.D., PhD, associate professor, ReutskayaYu.Yu., assistant
National Technical University of Ukraine"Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

Вступ

Незалежну оцінку дальності та швидкості цілі можуть забезпечити імпульсні складні сигнали із так званою кнопковою діаграмою невизначеності (ДН) [1]. Цю особливість у класі імпульсних частотномодульованих (ЧМ) сигналів мають сигнали із симетричною лінійною ЧМ (СЛЧМ) [2] та трапецеїдальною ЧМ [3]. Посилання на те, що таку саму ДН має сигнал з квадратичною частотною модуляцією (КВЧМ) приведено в [4]. Однак детальний аналіз цього сигналу не проводився.

Постановка задачі

Дослідити спектральні та кореляційні характеристики КВЧМ сигналу і визначити потенційну роздільну здатність сигналу за затримкою τ та доплерівською частотою f_d.

Дослідження потенційних характеристик сигналів з КВЧМ

Аналітично КВЧМ сигнал може бути записаний як [4]:

$$s(t) = rect(\frac{t}{t_i})\exp(\frac{j\pi\alpha t^3}{3})$$

де α – постійний коефіцієнт; t_i – тривалість зондувального сигналу, $rect(\frac{t}{t_i})$ – прямокутна обвідна.

Функція частотної модуляції з таким сигналом буде мати вигляд:

$$F(t) = \alpha|t|^2, \text{ де } |t| \le t_i.$$

Графічна залежність зміни частоти КВЧМ сигналу від часу та модульований сигнал представлені на рис. 1.

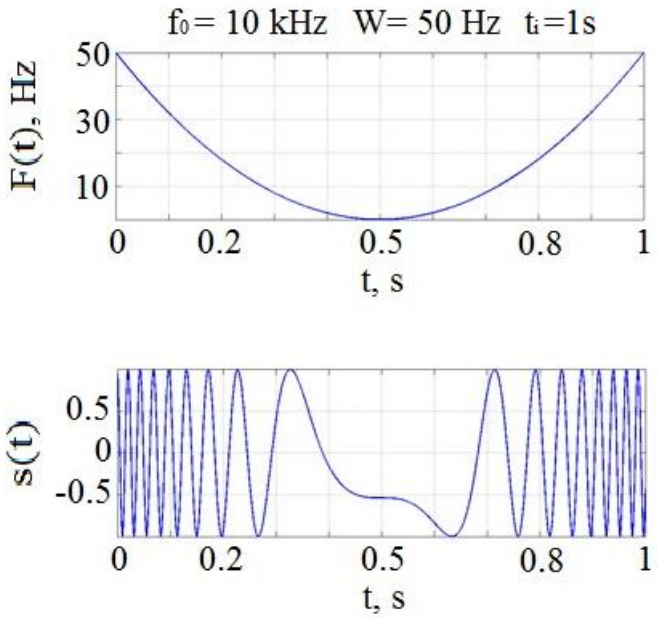

Рис.1. КВЧМ сигнал

Спектр сигналу з КВЧМ, розрахований методом стаціонарної фази, та записується у вигляді [4]:

$$S(f)=\sqrt{\frac{2}{t_i}}\cdot\frac{rect(\sqrt{f/\alpha}/t_i}{(\alpha f)^{1/4}}\cdot$$

$$\cdot\cos(\frac{4}{3}\pi f\sqrt{\frac{f}{\alpha}}-\frac{\pi}{4}),\alpha>0$$

Для розрахунку параметрів сигналу була розроблена програма у середовищі Matlab.

Амплітудно-частотні спектри (АЧС) сигналу з КВЧМ представлені на рис. 2. Вони мають нерівномірну форму і у межах смуги сигналу великі осциляції в межах від 0 до -40 дБ. Розрахунки виконувались для сигналу з частотою носійної $f_0=10$ Кгц та тривалістю імпульсу $t_i=1$с та смугою частот $2\Delta f=50\,\text{Гц}$ та $2\Delta f=100\,\text{Гц}$ (тобто, з відповідними базами сигналів 50 та 100.

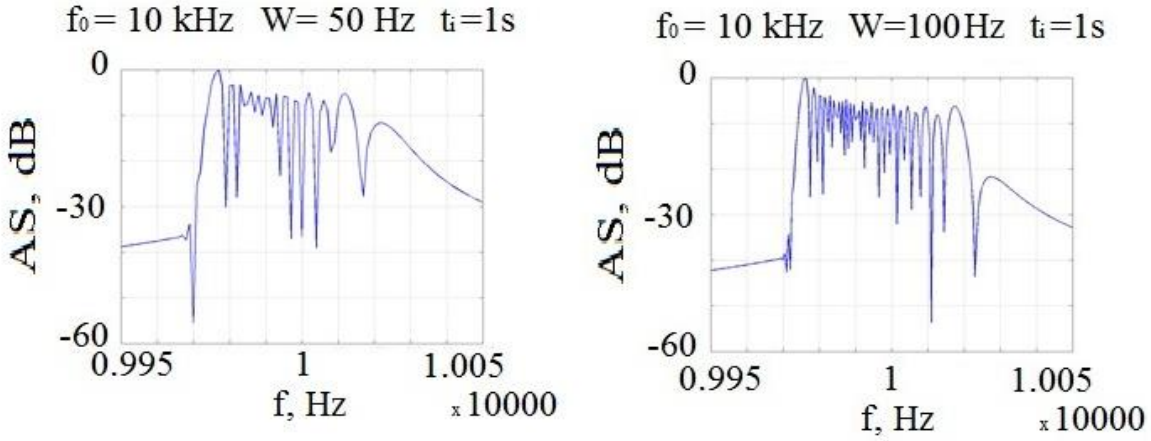

Рис. 2. Амплітудно-частотні спектри сигналу з КВЧМ з базою 50 та 100

Функція невизначеності КВЧМ сигналу має вигляд [4]:

$$\chi(\tau,f_d)=\frac{1}{2t_i\sqrt{\alpha\tau}}\exp(j\pi f_d\tau)\exp(-j\pi\left[(\frac{\alpha\tau^3}{6})-(\frac{{f_d}^2}{2\alpha\tau})\right]\cdot\left[Z^*(x_1)-Z^*(x_2)\right],$$

де $Z^*(x)$ – комплексний інтеграл Френеля,

$$x_1 = \sqrt{\alpha\tau}(t_i - |\tau|) + f_d / \sqrt{\alpha\tau},$$

$$x_2 = -\sqrt{\alpha\tau}(t_i - |\tau|) + f_d / \sqrt{\alpha\tau},$$

де f_d – частота Доплера, τ – затримка сигналу.

На рис. 3 видно, що за формою функція невизначеності КВЧМ сигналу в області сильної кореляції наближається до кнопкової, а в області слабкої має Х-подібну форму.

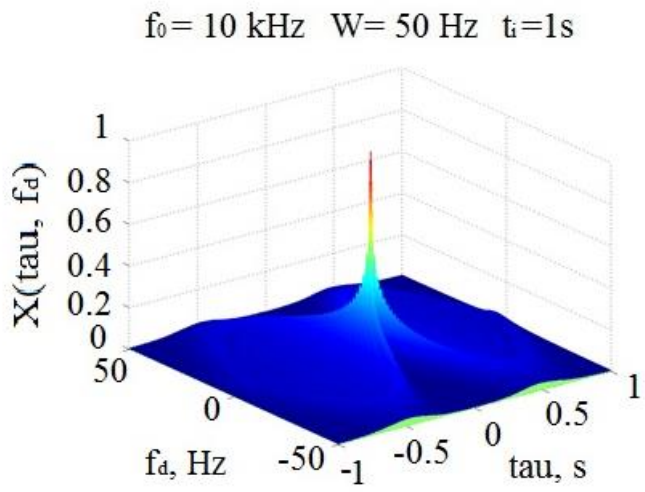

Рис.3. Функція невизначеності КВЧМ

Особливістю функції автокореляції (АКФ) сигналу з КВЧМ є те, що для даного сигналу відсутні бокові пелюстки, що дозволяє покращити роздільну здатність слабкого сигналу на фоні сильного. Замість них є так званий п'єдестал, рівень якого зменшується із збільшенням бази сигналу (рис. 4), і для даних параметрів сигналу становить менше, ніж 0,1 від максимуму. Можна бачити, що рівень п'єдесталу АКФ даного сигналу навіть нижчий за рівень п'єдесталу АКФ СЛЧМ [2].

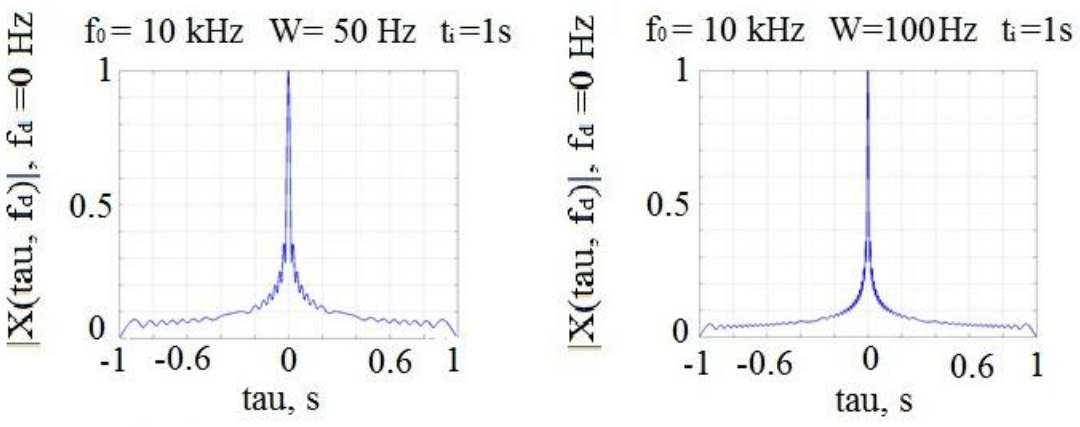

Рис.4. АКФ сигналів з КВЧМ з базами 50 та 100

Розглянемо поведінку АКФ для СЛЧМ та КВЧМ сигналів. Для зручності ці функції розміщені на одному графіку і виконані в однаковому масштабі (рис.5).

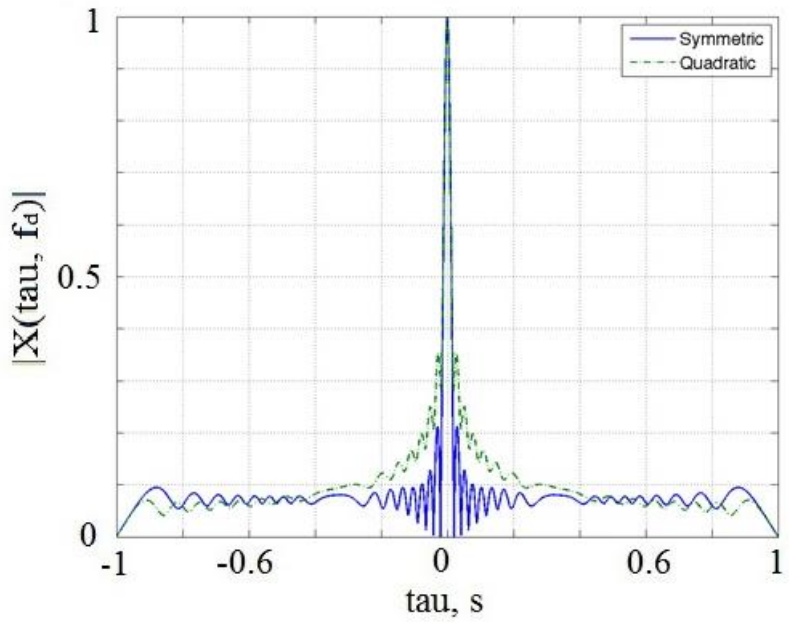

Рис. 5. АКФ сигналів з СЛЧМ та КВЧМ

У АКФ КВЧМ сигналу є два значних бокових пелюстка на рівні 0,35. Функція автокореляції СЛЧМ сигналу також має значні бокові пелюстки – по два з кожної сторони з рівнями 0,2 та 0,13. У КВЧМ сигналу вона більш гладка ніж у СЛЧМ сигналу, але АКФ КВЧМ сигналу має більші бокові пелюстки.

У разі спостереження пари вихідних сигналів можливо отримати незалежну оцінку дальності та швидкості одиночної рухомої цілі, використовуючи один канал обробки сигналу. Відстань між відгуками зондувального сигналу пропорційна швидкості цілі [2], а відстань до центру імпульсів пропорційна дальності до цілі.

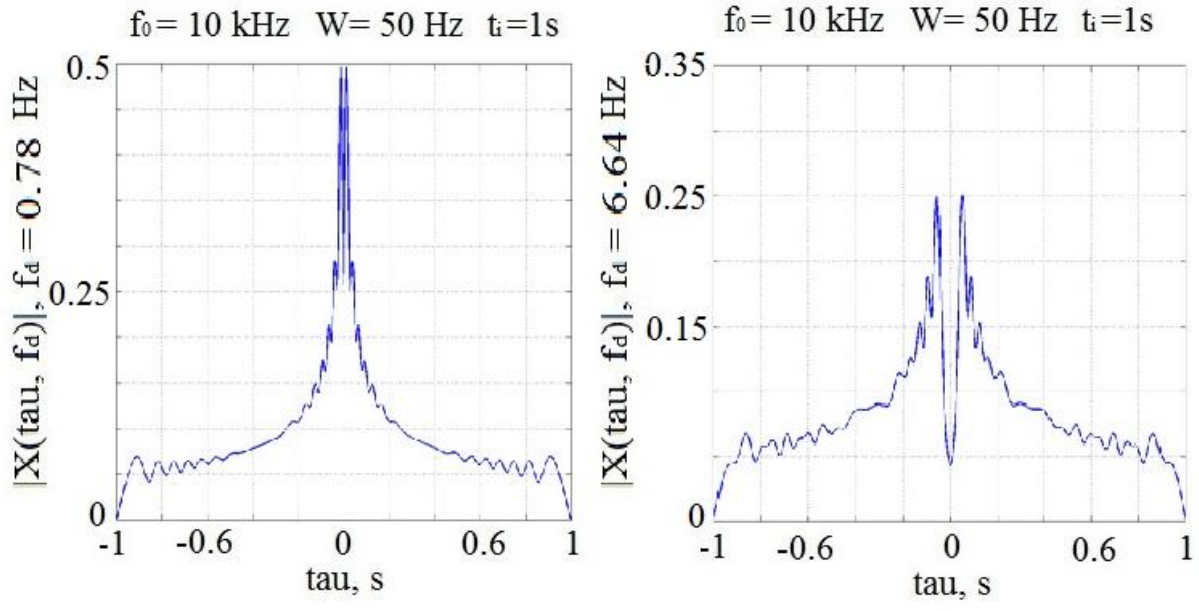

Рис. 6. ВКФ КВЧМ сигналів на рівнях 0.5 та 0.25 від максимуму

На рис. 6 представлені взаємнокореляційні функції (ВКФ) сигналів при таких частотах Доплера, що призводять до спадання максимуму на рівнях 0,5 та 0,25. Спадання до рівня 0,5 спостерігається для швидкості 0,1 морського вузла, а для рівня 0,25 – для швидкості 1,0 морського вузла. Розщеп-

лення вихідного сигналу на два сигнали є. Можна бачити, що на ріні 0.25 ВКФ цілком задовільна, але втрачається завадозахищеність, так як потрібно знижувати поріг виявлення сигналу.

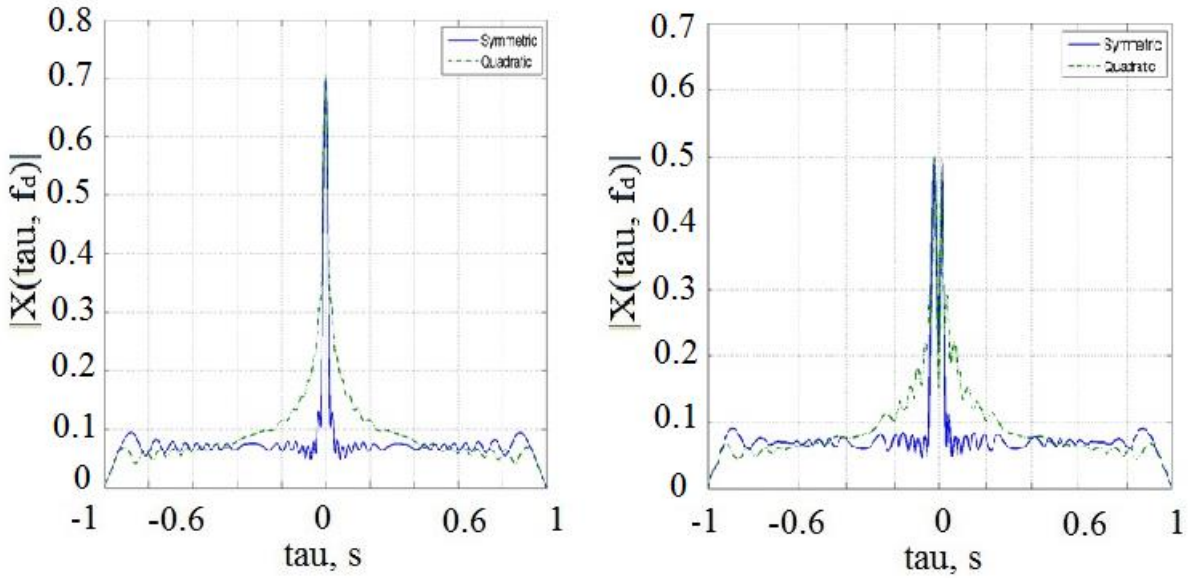

Рис. 7. ВКФ сигналів з СЛЧМ та КЧМ на рівнях0,707 та 0,5

На рис. 7. представлені ВКФ СЛЧМ та КВЧМ. З максимумом 0,707 ВКФ КВЧМ сигналу вже не має яскраво виражених бокових пелюсток (рис. 7б), що покращує роздільну здатність. З максимумом 0,5 ВКФ КВЧМ сигналу роздвоюється так само, як і сигнал СЛЧМ.

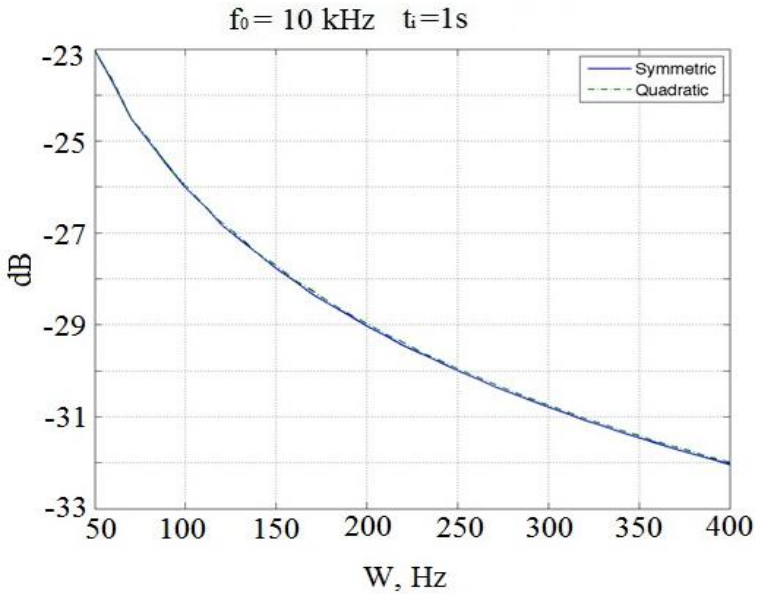

Рис. 8. Середній рівень п’єдесталу сигналів з СЛЧМ та КВЧМ

Функції АКФ та ВКФ СЛЧМ та КВЧМ сигналів мають деякий постійний рівень, який у даному випадку становить 0,1 і зменшується зі збільшенням бази сигналів.

Середній рівень п’єдесталу у СЛЧМ та КВЧМ практично однаковий на всьому проміжку значень полоси сигналу. На порівняльному графіку, що зображений на рис. 8, лінії СЛЧМ та КВЧМ сигналів практично збігаються.

Аналізуючи СЛЧМ та КВЧМ сигнали слід відмітити, що потенційна роздільна здатність (ПРЗ) цих сигналів на рівні 0,5 однакові. На рівні 0,707 сигнал з КЧМ має більшу ПРЗ ніж у СЛЧМ сигналу, а на рівні 0,9 – знов однакову (табл. 1).

За швидкістю ці сигнали мають однакові ПРЗ, що визначається формою обвідної – у даному випадку вона прямокутна (табл. 2). В таблицях 1 та 2 W – ширина смуги зондувального сигналу.

Таблиця 1.

Потенційні роздільні здатності СЛЧМ та КВЧМ сигналів за дальністю ($\Delta\tau$)

Рівні	0,9	0,707	0,5
СЛЧМ	$\frac{0,5}{W}$	$\frac{0,92}{W}$	$\frac{1,25}{W}$
КВЧМ	$\frac{0,5}{W}$	$\frac{0,88}{W}$	$\frac{1,25}{W}$

Таблиця 2.

Потенційні здатності СЛЧМ та КВЧМ сигналів за швидкістю ($\Delta f_д$)

Рівні	0,9	0,707	0,5
СЛЧМ	$\frac{0,5}{t_i}$	$\frac{0,88}{t_i}$	$\frac{1,2}{t_i}$
КВЧМ	$\frac{0,5}{t_i}$	$\frac{0,88}{t_i}$	$\frac{1,2}{t_i}$

Ізокореляти в області сильної кореляції представлені на рис. 9, а ізокореляти в області слабкої кореляції представлені на рис. 10.

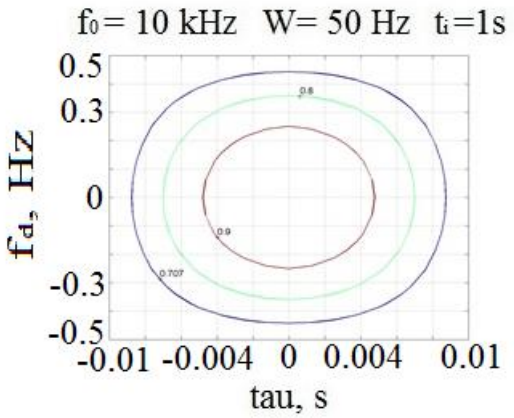

Рис. 9. Ізокореляти ФН в області сильної кореляції

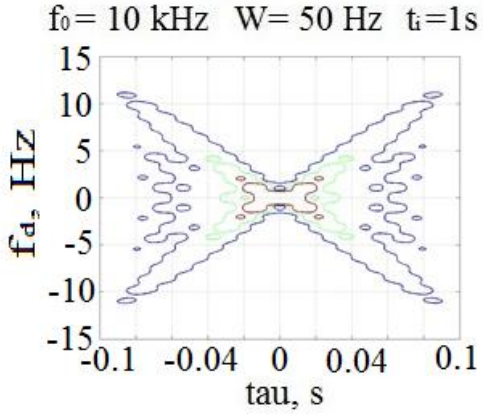

Рис. 10. Ізокореляти ФН в області слабкої кореляції

В області сильної кореляції ізокореляти ФН сигналу з КВЧМ мають колоподібну форму (рис. 9), що дає можливість отримати незалежну оцінку дальності та швидкості цілі. Ці ізокореляти практично збігаються з відповідними ізокорелятами ФН сигналу з СЛЧМ. Приблизно на рівні 0.5 від

максимуму еліпси починають переходити у Х-подібну форму (рис. 10), що можливо використати при одноканальній обробці рухомих одиночних цілей з одночасною незалежною оцінкою дальності та швидкості цілі.

Висновки

1. Амплітудно-частотний спектр КВЧМ сигналу в робочій смузі частот має великі осциляції рівень яких досягає – 40 дБ.

2. В області сильної кореляції АКФ та ВКФ КВЧМ сигналу характеризується гострим піком, що дозволяє оцінити дальність та швидкість цілі з високою точністю. В області слабкої кореляції АКФ та ВКФ не має бокових пелюсток, а характеризується п'єдесталом на рівні – 20 дБ.

3. Ширина АКФ та ВКФ сигналу слабо залежать від швидкості цілі.

4. Функція невизначеності КВЧМ сигналу в області сильної кореляції має яскраво виражену «голчату» форму з коловими ізокорелятами, що дозволяють отримати сумісну та незалежну оцінку дальності та швидкості цілі.

5. Функція невизначеності сигналу в області слабкої кореляції має Х-подібну форму, що дозволяє реалізувати одноканальну обробку рухомих одиночних цілей.

Література

1. Мрачковський О. Д. Классификация импульсных зондирующих локационных сигналов по виду диаграмм неопределенности / О. Д. Мрачковський // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2009. — №39. — С. 40 — 46.

2. Мрачковський О. Д. Аналіз спектральних та кореляційних характеристик зондуючого сигналу із трикутною внутрішньоімпульсною частотною модуляцією / О. Д. Мрачковський, Ю. Ю. Реутська, В. С. Соловйов // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2012. — №48. — С. 56 — 60.

3. Мрачковський О. Д. Аналіз зондуючого сигналу із трапецеїдальною внутрішньоімпульсною частотною модуляцією / О. Д. Мрачковський, Ю. Ю. Реутська, В. С. Соловйов // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2012. — №49. — С. 66 — 69.

4. Справочник по радиолокации. Под. Ред. М. Сколника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. под. общей ред. К. Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации. Под ред. Я. С. Ицхоки. М., «Сов. радио», 1976. — 456 с. — УДК 621.396.96(031).

References

1. Mrachkovskiy O. D., Klassifikaziya zondiruyuschih lokacionnih signalov po vidu diagram neopredelennosti. Visnik NTUU «KPI», seriya «Radiotechnika, radioaparatobuduvannya», 2009, no.39, pp. 40-46.

2. Mrachkovskiy O. D., Reutskaya Y. Y., Solovyov V. S. Analiz spectralnih ta korelazionnih harakteristik zonduyuchogo signal iz trikutnoyu vnutrischnoimpulsnoyu chastotnoyumodulazieu. Visnik NTUU «KPI», seriya «Radiotechnika, radioaparatobuduvannya», 2012, no. 48, pp. 56-60.

3. Mrachkovskiy O. D., Reutskaya Y. Y., Solovyov V. S. Analiz zonduyuchogo signal iz trapeziidalnoyu vnutrischnoimpulsnoyu chastotnoyu modulazieu. Visnik NTUU «KPI», seriya «Radiotechnika, radioaparatobuduvannya», 2012, no. 49, pp. 66-69.

4. Spravochnik po radiolokazii. Pod. red. M. Skolnika. Nyu-York, 1970. Per. Sang l. pod obschey red. K. N. Trofimova. Tom 1. Osnovu radiolokazii. Pod. red. Ya. S.Izkohi. Moscow, «Sov. radio», 1976, 456 p, UDK 621.396.96(031).

Мрачковський О.Д., Реутська Ю.Ю. ***Аналіз потенційних характеристик зондувального сигналу із квадратичною внутрішньо імпульсною частотною модуляцією.*** *Розглянуто сигнал із квадратичною частотною модуляцією і його особливості, приведені аналітичний запис сигналу та його спектра, графіки амплітудного спектра сигналів із різною базою, діаграма функції невизначеності, графіки взаємнокореляційної функції на різних рівнях від максимуму та ізокорелята функції невизначеності в області сильної та слабкої кореляції. Розглянуто особливості розщеплення взаємнокореляційної функції на два піки та наслідки цього ефекту.Проведено порівняння сигналу із квадратичною частотною модуляцією і сигнала з симетричною лінійною частотною модуляцією. Зроблені висновки щодо переваг та недоліків сигналу, зроблені висновки щодо доцільності та області використання сигналу.*

Ключові слова*: частотна модуляція, функція невизначеності, кореляція.*

Мрачковский О.Д., Реутская Ю.Ю. ***Анализ потенциальных характеристик зондирующего сигнала с квадратичной внутриимпульсной частотной модуляцией.*** *Рассмотрен сигнал с квадратичной частотной модуляцией и его особенности, приведены аналитическая запись сигнала и его спектра, графики амплитудного спектра сигналов с разной базой, диаграмма функции неопределенности, графики взаимнокорреляционной функции на разных уровнях от максимума и изокорреляты функции неопределённости в области сильной и слабой корреляции. Рассмотрены особенности расщепления взаимнокорреляционной функции на два пика и последствия этого эффекта. Проведено сравнение сигнала с квадратичной частотной модуляцией и сигнала с симметричной линейной модуляцией. Сделаны выводы насчет преимуществ и недостатков сигнала, сделаны выводы насчет целесообразности и области использования сигнала.*

Ключевые слова*: частотная модуляция, функция неопределённости, корреляция.*

Mrachkovskyi O.D., Reutskaya Yu.Yu. ***The potential characteristics analysis of probing signal with the quadratic frequency modulation.***

Introduction: *Complex signals with the button ambiguity function can provide the distance and speed of target independent estimation. The signal with the symmetrical linear frequency modulation has this property in the class of signal with frequency modulation.*

Problem statement: *To show that in the class of signals frequency-shift is signal with button ambiguity function. Such signal is a signal with the quadratic frequency intra-modulation.*

The potential characteristics research of signal with the quadratic frequency intra-modulation: *The signal with quadratic frequency modulation and its properties are considered, analytic form of signal and its spectrum are shown, figures of amplitude spectra of signal are drawn, and figures of ambiguity diagram, cross-correlation functions and response ambiguity function in strong and weak fields are shown. The comparison of the signal with the quadratic frequency intra-modulation and the signal with the symmetrical linear frequency modulation are shown. The result of research is that the ambiguity function form of a signal with the quadratic frequency intra-modulation comes nearer to button in the strong correlation field and it has X – for min the weak correlation field. The autocorrelation function of the signal with the quadratic frequency intra-modulation has some constant level which decreases with signal base increasing. It is revealed that autocorrelation function of the signal*

has no side lobes. It improves resolution capability of a weak signal against the strong signal. The pedestal level of the autocorrelation function of this signal is a little lower than pedestal level of the autocorrelation function of the signal with the symmetrical linear frequency modulation. Properties of section of cross-correlation function to two peaks and effect of these properties are considered. Signals with the quadratic frequency intra-modulation are expedient for using in the sonar of submarines, because in case of submarines detection the case of multiple targets existence is the improbable.

Conclusions: Conclusions about advantages and disadvantages of this signal are presented. The advantages are as follows: the autocorrelation function and the cross-correlation function of the signal with the quadratic frequency intra-modulation have no side lobes. The pedestal level of the autocorrelation function has level of smaller 0.1 for a signal with base 50. The cross-correlation function width feebly depends on speed of the target. The disadvantages are as follows: the direction of target movement can't be understood. It is compensated by existence of prior information about the target direction.

Keywords: *frequency modulation, ambiguity function, correlation.*