

**ДО ПИТАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ В КОГЕРЕНТНІЙ  
ІМПУЛЬСНО – ДОПЛЕРІВСЬКІЙ РАДІОЛОКАЦІЙНІЙ СТАНЦІІ,  
ЩО ВИПРОМІНЮЄ ІМПУЛЬСНИЙ СКЛАДНИЙ ЗОНДУВАЛЬНИЙ  
СИГНАЛ З КНОПКОВОЮ ДІАГРАМОЮ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

*Мрачковський О. Д., к.т.н., доцент; Реутська Ю. Ю., асистент  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», Київ, Україна*

**THE QUESTION OF THE DIGITAL PROCESSING IN THE COHERENT PULSE  
DOPPLER RADAR WHICH RADIATES THE PULSE COMPLICATED PROBING  
SIGNAL WITH A BUTTON TYPE AMBIGUITY DIAGRAM**

*Mrachkovskiy O. D., Cand. Of Sci (Technics), senior lecturer; Reutskaya Yu. Yu., assistant  
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

**Вступ**

Загальновідомі переваги використання імпульсних складних сигналів в радіолокації [1]. До них безумовно слід віднести підвищену завадостійкість на фоні природних та організованих місцевих завад, підвищення роздільної здатності за дальністю та радіальною складовою швидкості (доплерівською частотою), підвищену точність оцінки дальності та швидкості цілі, що виявляється, можливість ефективної роботи в умовах багатопроменевого поширення сигналів.

Окрім добре відомих переваг імпульсні складні сигнали мають підвищені скритності (часову, енергетичну та структурну)[2].

Часова скритність забезпечується скороченням довжини зондувального сигналу, а також зміною моменту часу його випромінювання. Енергетична скритність забезпечується за рахунок великого виграшу в вихідному співвідношенні сигнал/завада на фоні білого шуму, що дорівнює квадратному кореню з бази сигналу. Це дозволяє працювати в так званому режимі «тихої радіолокації» за рахунок можливого виявлення сигналів з вхідним співвідношенням сигнал/завада, меншим за одиницю. Структурна скритність характеризується здатністю протистояти ймовірному розвіднику (заходам, що направлені на розпізнавання форми сигналу та вимірювання його параметрів), згідно умови, що сигнал вже виявлений розвідувальними засобами.

До класу складних енергетично скритних імпульсних сигналів слід віднести сигнали, в яких внутрішньоімпульсна частотна модуляція (ЧМ) виконується за трикутним [3], трапецеїдальним [4], квадратичним та кубічним законами. Характерно, що діаграма невизначеності (ДН) цих сигналів

має «кнопкоподібну» форму, що дозволяє реалізувати сумісну та незалежну оцінку дальності та швидкості цілі. Недоліками вищезазначених сигналів є низька структурна скритність, що полягає в тому, що ЧМ модуляція може легко розпізнатися ймовірним розвідником [5].

До класу складних сигналів з високою структурною скритністю слід віднести сигнали з внутрішньоімпульсною фазовою маніпуляцією з псевдовипадковими послідовностями (ПВП) [6] або спорідненими їм послідовностями [7], які також мають «кнопкоподібну» ДН. Кнопкова ДН реалізує найбільшу потенційну роздільну здатність за дальністю, що дорівнює  $1/W$ , де  $W$  — ширина смуги сигналу, та найбільшу потенційну роздільну здатність за радіальною складовою швидкості, що дорівнює  $1/\tau_i$ , де  $\tau_i$  — довжина зондувального сигналу (рис.1).

Сигнали з «кнопковою» ДН доцільні для використання в когерентних імпульсно – доплерівських РЛС. Структура трактів виявлення таких РЛС багатоканальна за числом доплерівських каналів, утворюючи доплерівську гребінку узгоджених фільтрів або кореляторів, повторюючи власне структуру паралельного аналізатора спектра [8].

Вибір вигляду зондувальних сигналів завжди становив певні труднощі для конструктора РЛС. Річ в тому, що з моменту появи складних зондувальних сигналів число їх безперервно збільшувалося. Класифікація їх проводилася за видом закону модуляції (маніпуляції), що використовується. Упорядкувати різноманітність сигналів довелося за виглядом ДН, що реалізується [9]. Було відмічено, що для імпульсних зондувальних сигналів на сьогоднішній день відомі чотири види ДН: еліпсоїдна, похила еліпсоїдна, Х – подібна та кнопкоподібна.

### **Постановка задачі**

Оскільки розташування доплерівських каналів на частотній осі представляє певні технічні труднощі, в даній роботі нам належить:

1. Провести порівняльну оцінку потенційних роздільних здатностей за дальністю та радіальною швидкістю для вивчення сигналів, що мають кнопку ДН.
2. Розробити рекомендації для визначення числа доплерівських каналів.

**Мета статті** — оцінити складність реалізації багатоканальних трактів виявлення сигналу відбиття у вигляді багатоканального за доплерівською частотою тракту з використанням узгоджених фільтрів або кореляторів.

### **Аналіз потенційних характеристик складних сигналів**

Раніше нами були проаналізовані потенційні роздільні здатності вищевказаних сигналів [3,4] за дальністю та доплерівською частотою, що виміряні на різних рівнях відліку (0,9; 0,707; 0,5) від максимуму кореляційної функції. Узагальнимо отримані дані та приведемо їх в табличній формі, що зручна для порівняння.

Порівняльна оцінка потенційних роздільних здатностей за дальністю та радіальною складовою швидкості для вищевказаних сигналів приведена в табл.1. Можна бачити, що потенційні роздільні здатності за радіальною складовою швидкості складних зондувальних сигналів усіх проаналізованих видів приблизно однакова. Тому перевагами сигналів у вигляді ПВП над іншими проаналізованими складними сигналами є тільки висока інформаційна скритність та менший рівень бокових викидів [6].

Таблиця

Потенційна роздільна здатність за дальністю та радіальною швидкістю

Вид зондувального сигналу	Потенційна роздільна здатність за дальністю			Потенційна роздільна здатність за радіальною швидкістю		
	Рівні від максимуму			Рівні від максимуму		
	0,9	0,707	0,5	0,9	0,707	0,5
Сигнал з симетричною лінійною частотною модуляцією (СЛЧМ)	$\frac{0,5}{W}$	$\frac{0,92}{W}$	$\frac{1,25}{W}$	$\frac{0,5}{\tau_i}$	$\frac{0,88}{\tau_i}$	$\frac{1,2}{\tau_i}$
Сигнал з трапецеїдальною частотною модуляцією (ТЧМ)	$\frac{0,46}{W}$	$\frac{0,79}{W}$	$\frac{1,08}{W}$	$\frac{0,5}{\tau_i}$	$\frac{0,88}{\tau_i}$	$\frac{1,2}{\tau_i}$
Сигнал з квадратичною частотною модуляцією (ТРЧМ)	$\frac{0,5}{W}$	$\frac{0,88}{W}$	$\frac{1,25}{W}$	$\frac{0,5}{\tau_i}$	$\frac{0,88}{\tau_i}$	$\frac{1,2}{\tau_i}$
Сигнал з кубічною частотною модуляцією (КВЧМ)	$\frac{0,54}{W}$	$\frac{0,96}{W}$	$\frac{1,5}{W}$	$\frac{0,5}{\tau_i}$	$\frac{0,88}{\tau_i}$	$\frac{1,2}{\tau_i}$
Псевдовипадковий сигнал (ПВС)	$\frac{0,5}{W}$	$\frac{0,88}{W}$	$\frac{1,2}{W}$	$\frac{0,5}{\tau_i}$	$\frac{0,88}{\tau_i}$	$\frac{1,2}{\tau_i}$

Число доплерівських каналів в тракці виявлення РЛС визначається:

1. максимальною швидкістю цілі  $V_{\max}$ , що виявляється (

$$f_{d \max} = \pm \frac{2V_{\max}}{c} f_0, \text{ де } f_{d \max} \text{ — максимальна доплерівська частота } V_{\max} \text{ —}$$

максимальна швидкість цілі,  $f_0$  — робоча частота);

2. прийнятим рівнем відліку від максимуму кореляційної функції, тобто рівнями відліку: 0.9, 0.707 та 0.5;

3. потенційною роздільною здатністю за доплерівською частотою, що залежить від рівня відліку.

Розташування доплерівських каналів на частотній осі у разі відсутності «сліпих» швидкостей приведено на рис.1а, а у разі присутності «сліпих» швидкостей — на рис.1б.

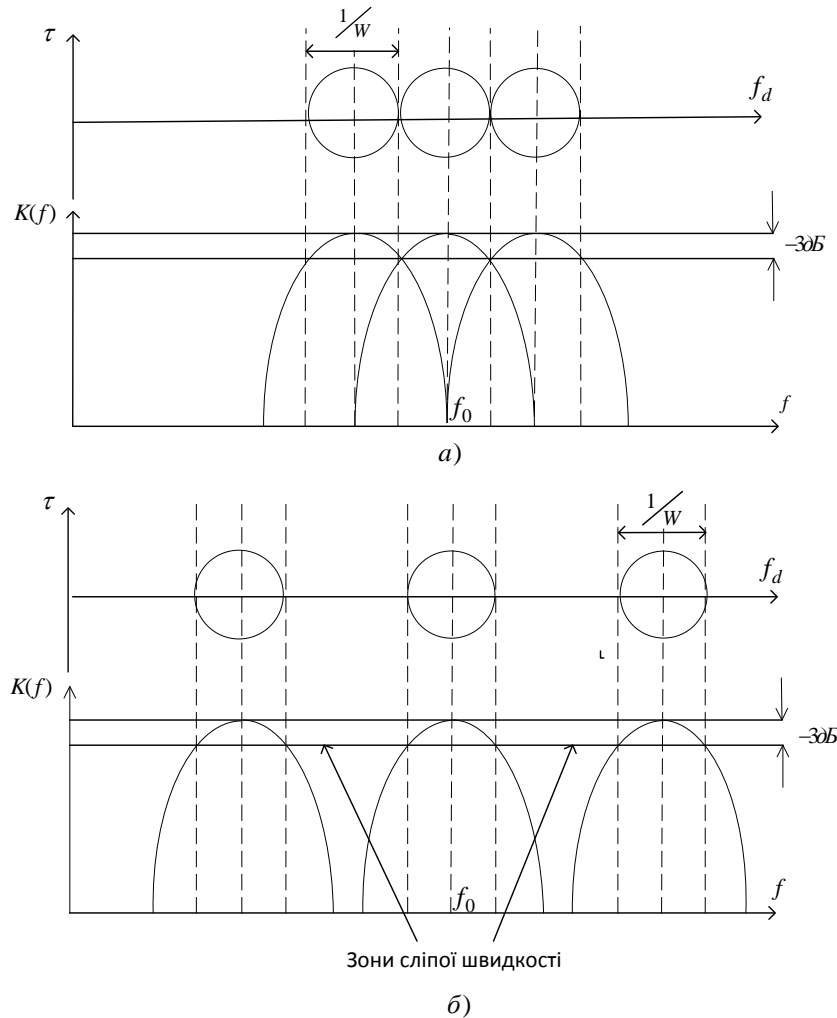


Рис.1. Розташування доплерівських каналів на частотній осі (а — з відсутністю «сліпих» швидкостей, б — з присутністю «сліпих» швидкостей)

Число доплерівських каналів багатоканального вимірювача доплерівської частоти відбитого сигналу визначається непарним цілочисленим значенням частки від ділення діапазону доплерівських частот  $2f_{d\max}$  на потencionу роздільну здатність зондувального сигналу за швидкістю

$$n = \frac{2f_{d\max}}{1/\tau_i} = 2f_{d\max}\tau_i.$$

Тракт оптимальної обробки на фоні білого шуму відбитого сигналу з невідомою амплітудою та фазою може бути реалізований за допомогою квадратурного узгодженого фільтру, що інваріантний до часу приходу відбитого сигналу, або за допомогою квадратурного корелятора, що інваріантний до зміни вигляду зондувального сигналу.

Структурна схема багатоканального за доплерівською частотою узгодженого фільтру для сигналу з невідомою амплітудою та фазою на фоні білого шуму представлена на рис.2, де в кожному доплерівському каналі перед пороговим пристроєм введений так званий *μ*фільтр для зменшення рівня бокових викидів псевдовипадкових сигналів [10].

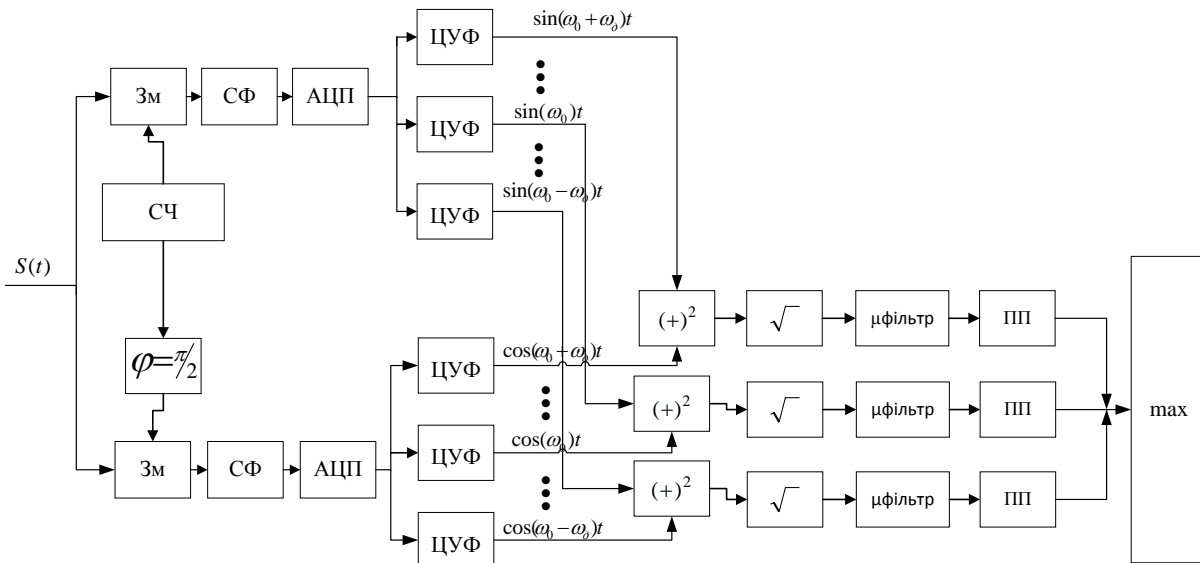


Рис. 2. Структурна схема квадратурної обробки ПВС сигналу за допомогою узгоджених фільтрів (Зм — змішувач, СЧ — синтезатор частоти,  $\varphi = \pi / 2$  — фазообертач, СФ — смуговий фільтр, АЦП — аналогово – цифровий перетворювач, ЦУФ — цифровий узгоджений фільтр,  $(+)^2$  — квадратичний суматор,  $\sqrt{\quad}$  — обчислювач квадратного кореня, *μфільтр* — фільтр бокових викидів, ПП — пороговий пристрій, max — схема відбору за максимумом)

Структурна схема багатоканального за доплерівською частотою корелятора з фільтрами зменшення бокових викидів для сигналу з невідомою амплітудою та фазою на фоні білого шуму представлена на рис.3.

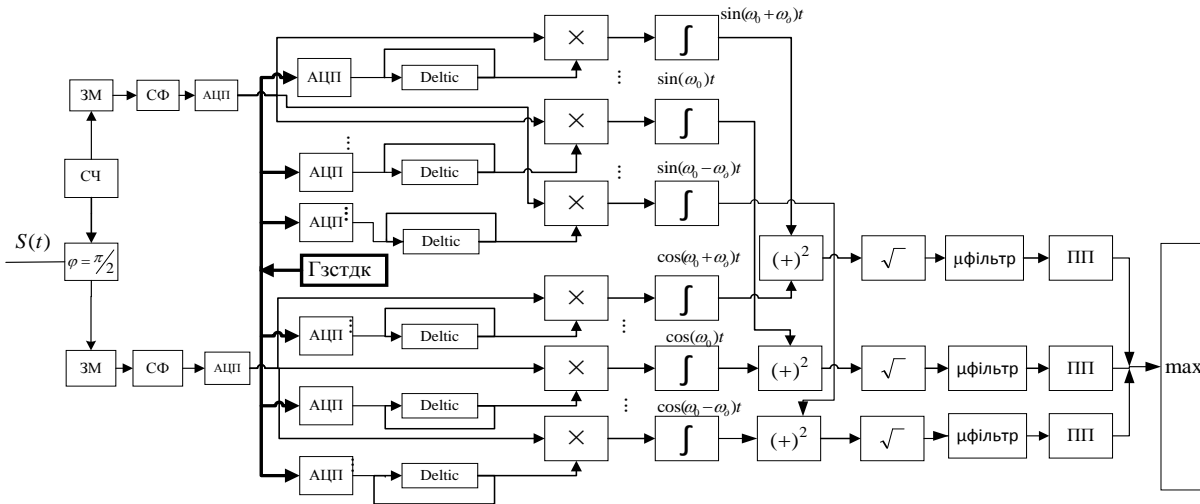


Рис. 3. Структурна схема квадратурної обробки ПВС сигналу за допомогою цифрових кореляторів (Зм — змішувач, СЧ — синтезатор частоти,  $\varphi = \pi / 2$  — фазообертач, СФ — смуговий фільтр, АЦП — аналогово – цифровий перетворювач, Гзстдк — генератор ПВС сигналу та доплерівських копій, Deltic (delay line time compressor) — рециркулятор зі зворотним зв'язком,  $\times$  — перемножувач,  $\int$  — інтегратор,  $(+)^2$  — квадратичний суматор,  $\sqrt{\quad}$  — обчислювач квадратного кореня, *μфільтр* — фільтр бокових викидів, ПП — пороговий пристрій, max — схема відбору за максимумом)

Результат аналізу структурних схем свідчить про те, що реалізація багатоканального за доплерівською частотою квадратурного корелятора технічно більш складна, особливо за рахунок наявності в цьому тракті складного блока формування зондувального сигналу з паралельними виходами так званих доплерівських копій, число яких дорівнює числу доплерівських каналів в тракті обробки відбитого сигналу.

### **Висновки**

1. Число доплерівських каналів в тракті виявлення РЛС визначається максимальною швидкістю цілі, рівнем відліку від максимуму кореляційної функції та потенційною роздільною здатністю за швидкістю зондувального сигналу, що використовується.

2. Використання будь-якого з видів розглянутих складних сигналів забезпечує однакове число каналів обробки.

3. Використання імпульсного сигналу у вигляді ПВП забезпечує часову, енергетичну і структурну скритність РЛС.

### **Література**

1. Баскаков А. И. Зондирующие радиолокационные сигналы: учебное пособие / А. И. Баскаков, Т. С. Жутяева, Ю. И. Лукашенко. — М. : Издательский дом МЭИ, 2011. — 56 с., — Режим доступа: 2819 . — ISBN 978-5-383-00659-7, УДК 621.391.82: 621.396 Б273

2. Захарченко Н. В. Оценка информационной скритности таймерных сигнальных конструкций в системах передачи конфиденциальной информации/ Н. В. Захарченко, В. В. Корчинский, Б. К. Радзимовский // Збірник наукових праць ОНАЗ ім.О.С.Попова. — 2011. — № 1. — С. 3—8. — УДК 691.321.25

3. Мрачковський О. Д. Аналіз спектральних та кореляційних характеристик зондувального сигналу із трикутною внутрішньоімпульсною частотною модуляцією / О. Д. Мрачковський., Ю. Ю. Реутська, В. С. Соловійов // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2012. — № 48. — С. 56—60, — УДК 621.396.62: 621.396.96

4. Мрачковський О. Д. Аналіз зондувального сигналу із трапецеїдальною внутрішньоімпульсною частотною модуляцією / О. Д. Мрачковський., Ю. Ю. Реутська, В. С. Соловійов // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2012. — № 49. — С. 66—70. — УДК 621.396.62

5. Мельников Ю.П. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников радиоизлучения / Ю. П. Мельников, С. В. Попов — М. : «Радиотехника», 2008. — 430 с. — УДК 621.396.969

6. Бичков В. Е. Дослідження потенційних характеристик псевдошумового радіолокаційного сигналу в області сильної і слабкої кореляції / В. Е. Бичков, О. Д. Мрачковський, І. В. Ольшевський // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2007. — № 34. — С. 37—42. — УДК 621.396.96

7. Борисов В. И., Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев — М. : «Радио и связь», 2003. — 640с. — ISBN – 5 – 256 – 01672 – 5

8. Цифровые анализаторы спектра / [Плотников В. Н., Белинский А. В., Суханов В. А., Жигулевцев Ю. Н.] — М. : «Радио и связь», 1990. — 182 с. — УДК 621.396.969

9. Мрачковський О. Д. Классификация импульсных зондирующих сигналов по виду диаграммы неопределенности / О. Д. Мрачковський // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2009. — № 39. — С. 40—46. — УДК 621.396.62

10. Бичков В. Е. Фільтри зменшення бічних пелюстків / В. Е. Бичков // Вісник НТУУ «КПІ», серія «Радіотехніка, радіоапаратобудування». — 2010. — №41. — С. 43—46. — УДК 621.396.96

#### References

1. Baskakov A. I., Zhutiaeva T. S., Lukashenko Yu. I. Zondiruiushchie radiolokatsionnye signaly: uchebnoe posobie. M. : Izdatelskii dom MEI, 2011, 56 p., – Rezhim dostupa : 2819. – ISBN 978-5-383-00659-7, UDK 621.396 Z-84

2. Zakharchenko N. V., Korchinskii V. V., Radzimovskii B. K. Otsenka informatsionnoi skrytnosti taimernykh signalnykh konstruktsii v sistemakh peredachi konfidentsialnoi informatsii. Zbirnyk naukovykh prats ONAZ im.O.S.Popova, 2011, № 1, pp. 3–8, UDK 691.321.25

3. Mrachkovskiy O. D., Reutska Yu. Yu., Soloviov V. S. Analiz spektralnykh ta korelatsiinykh kharakterystyk zonduiuchogo syhnalu iz trykutnoi vnutrishnoimpulsnoi chastotnoi moduliatsiiei. Visnyk NTUU «KPI», seriia «Radiotekhnika, radioaпаратobuduvannia», №48, 2012, pp. 56-60, UDK 621.396.62: 621.396.96

4. Mrachkovskiy O. D., Reutska Yu. Yu., Soloviov V. S. Analiz zonduiuchogo syhnalu iz trapeceiidalnoi vnutrishnoimpulsnoi chastotnoi moduliatsiiei. Visnyk NTUU «KPI», seriia «Radiotekhnika, radioaпаратobuduvannia», №49, 2012, pp. 66-70, UDK 621.396.62

5. Melnikov Yu. P., Popov S. V. Radiotekhnicheskaiia razvedka. Metody otsenki effektivnosti mestoopredeleniia istochnikov radioizlucheniia. M. : «Radiotekhnika», 2008. – 430 p., UDK 621. 396.969

6. Bychkov V. E., Mrachkovsky O. D., Olshevskiy I. V. Doslidzhennia potentsiinykh kharakterystyk psevdoshumovoho radiolokatsiynogo syhnalu v oblasti sylnoi i slabkoi koreliatsii. Visnyk NTUU «KPI», seriia «Radiotekhnika, radioaпаратobuduvannia», №34, 2007, pp. 37-42, UDK 621.396.96

7. Borisov V. I., Zinchuk V. M., Limarev A. E. Pomehozashchishchennost sistem radiosviazi s rasshireniem spektra signalov. M. : «Radio i sviaz», 2003, 640p., ISBN–5–256–01672–5

8. Plotnikov V. N., Belinskii A. V., Suhanov V. A., Zhigulevtsev Yu. N. Tsifrovye analizatory spektra. M. : «Radio i sviaz», 1990, 182 p., UDK 621. 396.969

9. Mrachkovskiy O. D. Klassifikatsiia impulsnykh zondiruiushchikh signalov po vidu diagrammy neopredelennosti. Visnyk NTUU «KPI», seriia «Radiotekhnika, radioaпаратobuduvannia», №39, 2009, pp. 40-46, UDK 621.396.62

10. Bychkov V.E. Filtry zmeshennia bichnykh peliustkiv. Visnyk NTUU «KPI», seriia «Radiotekhnika, radioaпаратobuduvannia», №41, 2010, pp. 43-46, UDK 621.396.96

*Мрачковський О. Д., Реутська Ю. Ю. До питання цифрової обробки в когерентній імпульсно – доплерівській радіолокаційній станції, що випромінює імпульсний складний зондувальний сигнал з кнопковою діаграмою невизначеності. Проаналізовано потенційні роздільні здатності за дальністю та радіальною швидкістю імпульсних складних сигналів із симетричною лінійною частотною модуляцією, трикутною, трапецеїдалною, квадратичною, кубічною частотною модуляцією та псевдовипадкових сигналів. Зроблені висновки щодо переваг відповідних складних сигналів з кнопкоподібною діаграмою невизначеності. Розроблено рекомендації для визначення числа доплерівських каналів. Оцінено складність реалізації багатоканальних трактів виявлення сигналу відбиття у вигляді багатоканального за доплерівською частотою тракту на базі узгоджених фільтрів або кореляторів з наданням відповідних структурних схем.*

**Ключові слова:** частотна модуляція, функція невизначеності, узгоджений фільтр, корелятор, доплерівська частота.

*Мрачковский О. Д., Реутская Ю. Ю. К вопросу цифровой обработки в когерентной импульсно – доплеровской радиолокационной станции, излучающей импульсный сложный зондирующий сигнал с кнопочной диаграммой неопределенности. Проанализированы потенциальные разрешающие способности по дальности и радиальной скорости импульсных сложных сигналов с симметричной линейной частотной модуляцией, треугольной, трапецеидальной, квадратичной, кубической частотной модуляцией и псевдослучайных сигналов. Сделаны выводы относительно преимуществ соответствующих сложных сигналов с кнопочной диаграммой неопределенности. Разработаны рекомендации для определения числа доплеровских каналов. Оценена сложность реализации многоканальных трактов обнаружения отраженного сигнала в виде многоканального по доплеровской частоте тракта на базе согласованных фильтров или корреляторов с предоставлением соответствующих структурных схем.*

**Ключевые слова:** частотная модуляция, функция неопределенности, согласованный фильтр, коррелятор, доплеровская частота.

*Mrachkovskiy O. D., Reutskaya Yu. Yu. The question of the digital processing in the coherent pulse doppler radar which radiates the pulse complicated probing signal with a button type ambiguity diagram.*

*Introduction: The advantages of the pulse complicated signals using in the radar are well-known. These signals are signals with the high time security, the high power security or (and) the high structural security. The signal with the symmetrical linear frequency modulation, the signal with the triangular frequency modulation, the signal with the trapezoidal frequency modulation, the signal with the quadratic and with the cubic frequency intra-modulation and the signal with pseudorandom sequence have the button ambiguity function.*

*Problem statement: It is necessary:*

- *To conduct the comparative estimation of the distance resolution and the range rate resolution (Doppler resolution) for signals with the button type ambiguity diagram;*
- *To develop recommendations for determination of the Doppler channels number;*

*Purpose of the article: To estimate the complication of the multichannel locations highways realization of echo signal as the multichannel Doppler-beat frequency highway on the base of matched filters or correlators.*

*The analysis of complicated signals potential characteristics: Potential characteristics of the distance resolution and the range rate resolution for the signal with the symmetrical linear frequency modulation, the signal with the triangular frequency modulation, the signal with the trapezoidal frequency modulation, the signal with the quadratic and with the cubic frequency intra-modulation and the signal with pseudorandom sequence are analyzed. Conclusions to advantages of these pulse complicated signals with the button ambiguity function are drawn. Recommendations for determination of the Doppler channels number are developed. The complication of the multichannel locations highways realization of echo signal as the multichannel Doppler-beat frequency highway on the base of matched filters or correlators is estimated.*

*The block diagrams analysis result testifies that the realization of the multichannel Doppler-beat frequency correlator is technically more difficult. In this scheme there is the difficult block with the formation of a probing signal with parallel releases of the so-called Doppler copies.*

*Conclusions: The number of the Doppler channels in the radar locations highway determined by maximum target velocity by the falling possible level of the noise immunity and of the distance resolution and the range rate resolution of probing signal that is used. The use of the considered complicated signals any types provides the identical number of processing channels. The use of the signal with pseudorandom sequence supports the high time security, the high power security and the high structural security.*

**Keywords:** frequency modulation, ambiguity function, matched filter, correlator, Doppler frequency.