

УДК 621.396.96

Є.С. Герасименко, А.М. Зубков

Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

## МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ СПЕКТРАЛЬНИХ НЕСТАБІЛЬНОСТЕЙ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ТРАКТУ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОГЕРЕНТНОЇ ОБРОБКИ ЕХО-СИГНАЛІВ

Проведено аналіз методів обробки ехо-сигналів в імпульсних радіолокаційних станціях (РЛС) з низько-стабільними елементами приймально-передавального тракту. Запропоновано метод узгодженої обробки ехо-сигналів, що враховує внутрішньоімпульсні нестабільності зондуючих радіоімпульсів, а також структурна схема псевдокогерентної РЛС, яка реалізує даний підхід.

**Ключові слова:** виявлення наземних цілей, селекція рухомих цілей, когерентна обробка сигналів, некогерентна РЛС.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Проблема виявлення наземних цілей на фоні інтенсивних віддзеркалень від земної поверхні була й залишається актуальною. Найбільш ефективно вона вирішується доплерівськими методами селекції рухомих цілей (СРЦ) в когерентних та псевдокогерентних РЛС [1]. Однак зниження або повна відсутність радіальної складової швидкості в траєкторії руху цілі, наприклад, в наслідок її зупинки, виключає застосування доплерівського методу в класичній постановці. З іншої сторони, саме цілі, які знизили швидкість руху або нерухомі є найбільш небезпечним джерелом можливого вогневого впливу. Крім того, важливе значення має та обставина, що когерентні та псевдокогерентні РЛС за технічною складністю, через необхідність забезпечення спектральної стабільності елементів приймально-передавального тракту, значно перевищують за аналогічним об'ємом некогерентні і, як наслідок, є більш дорогими у виробництві. Актуальною науково-технічною задачею є створення некогерентних засобів радіолокаційного спостереження, які енергетично еквівалентні когерентним та забезпечують мінімізацію апаратних затрат за критерієм "ефективність/вартість".

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вперше задача покращення характеристик СРЦ шляхом зниження впливу спектральних нестабільностей елементів приймально-передавального тракту РЛС розглянута з прикладної сторони в роботах [2–3]. Подальшим розвитком досліджень в цьому напрямку слід вважати [4–6]. Стимулом для проведення цих робіт було вдосконалення характеристик цифрової елементної бази. Основним інструментом для досягнення мети в зазначених роботах є використання для обробки відгалуженого зондуючого сигналу та ехо-сигналів єдиного приймального тракту. Практична реалізація цих досліджень забезпечує когерентну обробку ехо-сигналів для підвищення

ефективності систем СРЦ. Наступним кроком у розвитку зазначеного підходу можна розглядати застосування його для виявлення наземних цілей, незалежно від наявності або відсутності їх руху. Останнє досягається за рахунок аналого-цифрового перетворення (АЦП) зондуючого та ехо-сигналу в кожному радіолокаційному такті з частотою дискретизації не менш  $2f_{\text{пч}}$ , де  $f_{\text{пч}}$  – проміжна частота, та подальшої внутрішньоперіодної та міжперіодної обробки в спектральній [7] або часовій області [8].

**Мета статті** – розробка методу забезпечення узгодженої обробки ехо-сигналів в РЛС з низько-стабільними елементами приймально-передавального тракту.

### Виклад основного матеріалу

Необхідною умовою виявлення наземних цілей в РЛС, які використовують спектральні методи є наявність руху цілі. При чому, на виявлення малорухомих та нерухомих цілей на фоні інтенсивних віддзеркалень від земної поверхні впливає розширення спектру пасивних завад, яке викликано хаотичними флуктуаціями відбивачів в кожному імпульсному об'ємі, що призводить до міжперіодної випадкової зміни амплітуди та фази завади. Іншим джерелом зниження ефективності спектральних методів є нестабільність характеристик РЛС (несучої частоти, амплітуди, початкової фази, тривалості зондуючих сигналів та періоду їх слідування, частоти сигналів місцевого та когерентного гетеродинів, параметрів системи міжперіодної обробки сигналів тощо), що еквівалентно розширенню спектру завади [9]. Саме той факт, що спектр пасивної завади перекриває спектр корисного сигналу робить селекцію малорухомих та нерухомих наземних цілей на основі ефекту Доплера малоефективною. Тому зусилля розробників концентруються на пошуках структурних відмінностей ехо-сигналів цілі та розподіленої в її околицях пасивної завади [10–11].

В реальних радіолокаційних системах частота коливань, що формується імпульсними генераторами не є постійною і містить випадкові флуктуаційні складові, що викликані особливістю формування імпульсів конкретним приладом, тепловими ефектами та нестабільністю джерел живлення. Наявність випадкових змін частоти призводить до зниження відношення сигнал/шум в пристроях узгодженої обробки ехо-сигналів від якого в першу чергу залежать якісні показники РЛС.

З міркувань досягнення високого коефіцієнту корисної дії, при обмежених об'ємах високоенергетичних передавальних пристроїв та вартості, в практичній радіолокації найбільше розповсюдження в якості імпульсного автогенератора отримав магнетрон.

В загальному випадку модель зондуючого сигналу на виході магнетронного передавача може бути записана у вигляді [12]

$$u(t) = U(t) \cos \begin{cases} \omega_0 t \pm \Delta\omega_{зч} + \frac{at^2}{2} + \theta_0, & t_n \leq t \leq t_\phi; \\ \omega_0 t \pm \Delta\omega_{зч} - \frac{bt^2}{2} + \theta_0, & t_\phi < t \leq t_u, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\omega_0$  – несуча частота;

$\Delta\omega_{зч}$  – максимальна величина “затягування” частоти, що визначається реакцією навантаження (для узгоджених трактів з коефіцієнтом відбиття не більше 0,2 є сталою);

$\tau_u$  – тривалість радіоімпульсу;

$t_n$  – час початку генерації імпульсу;

$t_\phi$  – тривалість переднього фронту модулюючого імпульсу;

$\theta_0$  – початкова фаза;

$$U(t) = \begin{cases} U_0, & |t| \leq \tau_u; \\ 0, & |t| > \tau_u; \end{cases}$$

$$a = \frac{2\pi\mu\Delta I_\phi}{t_\phi - t_n};$$

$$b = \frac{2\pi\mu\Delta I_b}{\tau_n - t_\phi};$$

де  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, що характеризують робочий діапазон частот магнетрону;

$\Delta I_\phi$  та  $\Delta I_b$  – зміни току магнетрону на фронті та вершині модулюючого імпульсу;

$\mu$  – стала величина, що характеризує конструкцію магнетрона наприклад, наявність або відсутність накалу катоду.

У виразі (1) допущені наступні фізично виправданні передумови:

– не враховується незначне електронне зміщення частоти магнетрону на задньому фронті мо-

дулюючого імпульсу;

– закони електронного зміщення частоти на передньому фронті та плоскій вершині модулюючого імпульсу прийняті лінійними, чому відповідають квадратичні закони зміни фази.

В спектральній області для одиночного радіоімпульсу прямокульної форми врахування внутрішньоімпульсної частотної модуляції призводить до відхилення форми обвідної спектру сигналу від закону  $\frac{\sin x}{x}$ , який є загальноприйнятим при аналізі простих сигналів, в сторону збільшення бокових складових. В роботі [12] запропоновано використання енергії цих складових для збільшення роздільної здатності за дальністю. При цьому показано, що отриманий у порівнянні з простими сигналами вираш змінюється в залежності від дальності до цілі.

Якщо кінцевою метою обробки пачки ехо-сигналів в умовах впливу внутрішньоімпульсних нестабільностей є максимізація відношення “потужність корисного сигналу/потужність внутрішньо-приймальних шумів”, незалежно від дальності до цілі, необхідно реалізувати узгоджену поімпульсну структурну фільтрацію [10–11] з подальшим когерентним або некогерентним накопиченням.

Оскільки енергетичний розрив між когерентним та некогерентним накопиченням пропорційний кількості імпульсів, що накопичуються [13], природним є прагнення розробників РЛС до когерентних методів обробки ехо-сигналів. На практиці внутрішньоімпульсна обробка здійснюється в підсилювачі проміжної частоти (ППЧ) приймального тракту РЛС. При цьому, смуга пропускання ППЧ із міркувань збереження форми обвідної радіоімпульсу обирається

$$\Delta f_{пч} \approx \frac{1}{t_\phi},$$

що значно більше ніж ширина основної пелюстки функції  $\frac{\sin x}{x}$ .

Остання обставина в сукупності із застосуванням швидкодіючих АЦП дозволяє враховувати при внутрішньоімпульсній обробці фазові набіги в межах фронту та вершини зондуючого імпульсу, які визначаються виразом (1). Слід відмітити, що довготривалі відходи частоти магнетронного передавача компенсуються традиційними схемами автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) [14].

Узагальнена структурна схема псевдокогерентної РЛС, що реалізує запропонований підхід представлена на рис. 1. На схемі введені наступні позначення: СВ – спрямований відгалужувач, ПРДп – передавальний пристрій, КК – керований комутатор, МГ – місцевий гетеродин, ППЧ – підсилювач про-

міжної частоти, КП – керований перемикач, ЗМ АПЧ – змішувач АПЧ, ТАПЧ – тракт АПЧ, СХ – синхронізатор, ЗП – запам'ятовуючий пристрій,

СП – сигнальний процесор, УФВО – узгоджений фільтр внутрішньоімпульсної обробки, УФМО – узгоджений фільтр міжперіодної обробки.

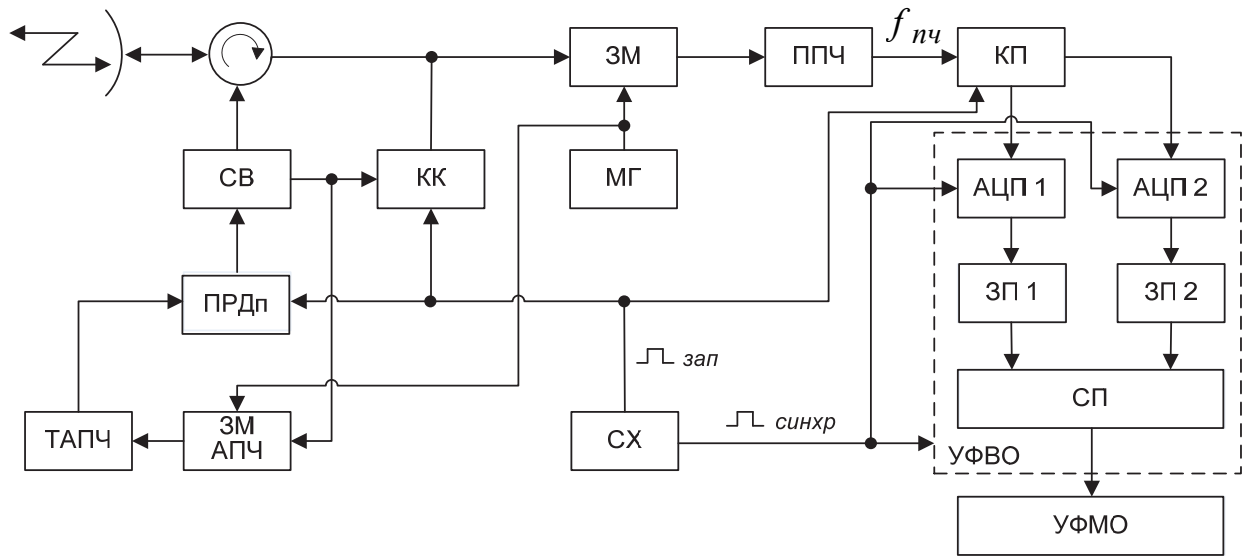


Рис. 1. Структурна схема псевдокогерентної РЛС, що реалізує метод компенсації спектральних нестабільностей елементів приймально-передавального тракту

Позитивний ефект досягається за рахунок проходження опорного (зонduючого) та ехо-сигналів через одні й ті ж каскади приймального тракту, що поряд із зменшенням апаратних затрат виключає вплив нестабільностей характеристик цих каскадів.

Необхідно відмітити, що частота синхронізації імпульсів вибірок АЦП та УФВО повинна задовольняти теоремі Котельникова для проміжної частоти  $f_{пч}$ . СП в кожному елементі розрізнення за дальністю  $\frac{ct_v}{2}$  ( $c$  – швидкість розповсюдження радіохвиль) здійснює операцію перемноження цифрових значень зонduючого імпульсу (1), який запам'ятали в момент випромінювання, на цифрові значення інвертованого по фазі ехо-сигналу. Міжперіодна обробка пачки ехо-сигналів може здійснюватись любым з відомих методів когерентного накопичення в часовій або спектральній області, зокрема з урахуванням компенсації пасивних завад за рахунок СРЦ [13].

Підхід, що пропонується, може бути застосований і у випадку компенсації довготривалих відходів частоти магнетронного передавача шляхом підстроювання частоти гетеродина пристрою.

### Висновки

Розроблено новий підхід до підвищення енергетичної ефективності некогерентних РЛС, який дозволяє без зміни найбільш вартісної та консервативної частини (передавального пристрою) забезпечити розширення бойових можливостей станцій за показником дальності виявлення наземних цілей, незалежно від радіальної швидкості їх руху.

### Список літератури

1. Бакулев П.А. Методы и устройства селекции движущихся целей / П.А. Бакулев, В.М. Степин. – М.: Радио и связь, 1986. – 288 с.
2. Патент США US4040055 А, кл. G01S 9/42. Digital compensator for transmitter instability / Thomas H. Donahue, David E. Hammers; опубл. 02.08.77.
3. А. с. SU 793121 СССР, G01S9/42. Импульсная радиолокационная станция с селекцией движущихся целей / А.Н. Зубков, П.В. Федосюк; опубл. 30.08.79.
4. Патент RU 2054691 С1 Российская Федерация, МПК6 G01S7/292. Способ обработки некогерентного пакета радиоимпульсов / С.В. Дядочкин, В.И. Слюсар, И.И. Слюсар; опубл. 20.02.96.
5. Патент на полезную модель RU 123179 U1 Российская Федерация. Радиолокационное устройство с цифровой селекцией движущихся целей / О.И. Окуловский, В.В. Ткаченко, В.А. Кулишкин и др.; опубл. 20.12.12.
6. Камалтинов Г.Г. Шляхи забезпечення еквівалентної внутрішньої когерентності в РЛС з магнетронними генераторами з використанням сучасної цифрової елементної бази / Г.Г. Камалтинов, В.Й. Климченко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – № 3(44). – С. 80-87.
7. Патент на полезную модель RU 55999 Российская Федерация. РЛС с когерентным приемом отраженного сигнала при некогерентном излучении зондирующего сигнала / А.А. Васин, П.В. Гареев, В.Ф. Семухин, С.В. Валов.
8. Патент США US 7.855.674. Method and radar system for coherent detection of moving objects / Per Atle Valand; опубл. 13.07.06.
9. Ботов М.И. Основы теории радиолокационных систем и комплексов / М.И. Ботов, В.А. Вяхирев. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 530 с.
10. Зубков А.Н. Системы радиовидения миллиметрового диапазона. 1. Принципы построения / А.Н. Зубков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48, № 9. – С. 3-16.

11. Зубков А.Н. Системы радиовидения миллиметрового диапазона. 2. Сопоставление и интеграция с оптическими каналами, результаты эксперимента / А.Н. Зубков // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2005. – Т. 48, № 10. – С. 3-10.

12. Шинкарук О. М. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей / О.М. Шинкарук, І.І. Чесановський. // Збірник наукових праць ВІКНУ імені Тараса Шевченка. – 2009. – № 17. – С. 89-92.

13. Вопросы статистической теории радиолокации в 2-х томах / П.А. Бакут, И.А. Большаков, Б.М. Герасимов

и др.; под ред. Г.П. Тарковского. – М.: Сов. радио, 1963. – Т. 1. – 424 с.

14. Свистов В.М. Радиолокационные сигналы и их обработка / В.М. Свистов. – М.: Сов. радио, 1977. – 446 с.

Надійшла до редколегії 5.10.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співробітник О.М. Купріненко, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

### МЕТОД КОМПЕНСАЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОГЕРЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ ЭХО-СИГНАЛОВ

Е.С. Герасименко, А.Н. Зубков

Проведен анализ методов обработки эхо-сигналов в импульсных радиолокационных станциях (РЛС) с низкостабильными элементами приемно-передающего тракта. Предложен метод согласованной обработки эхо-сигналов который учитывает внутриимпульсные нестабильности зондирующих радиоимпульсов, а также структурная схема псевдокогерентной РЛС реализующей данный подход.

**Ключевые слова:** обнаружение наземных целей, селекция движущихся целей, когерентная обработка эхо-сигналов, некогерентная РЛС.

### COMPENSATION METHOD OF ELEMENTS SPECTRAL INSTABILITIES OF TRANSMITTER-RECEIVER PATH OF RADAR FOR PROVIDING OF COHERENT ECHO-SIGNAL PROCESSING

Y.S. Herasymenko, A.M. Zubkov

The article deals with the analysis of echo signal processing methods of pulse radars (PR) with low-stable elements of transmitter-receiver path. It is proposed the method of coordinated echo signal processing that takes into account the inner pulse instabilities of the probe radar pulse, and also the pseudocoherent PR block schematic diagram that realizes this approach.

**Keywords:** ground targets detection, moving targets selection, coherent signal processing, noncoherent pulse radar.