

# Розвиток бойового застосування радіотехнічних військ

УДК 621.396.96

В.Й. Климченко, О.В. Очкуренко, А.Ю. Шрамков

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## СТРУКТУРА ЗАХИЩЕНОГО ВІД ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД РАДІОЛОКАТОРА З НИЗКОСТАБІЛЬНИМИ ГЕНЕРАТОРНИМИ ПРИБАДАМИ

*Розглянутий вплив нестабільностей несучої частоти зондуєчих сигналів на міжперіодну кореляцію пасивних перешкод. Визначені шляхи зменшення впливу нестабільності несучої частоти радіоімпульсів на ефективність системи селекції рухомих цілей. Проведений аналіз необхідної точності роботи адаптивного фільтру-коректора, при якій досягається висока ефективність роботи системи селекції рухомих цілей. Викладені рекомендації щодо зміни структури приймально-передавального тракту РЛС. Запропонований варіант структури захищеного від пасивних перешкод радіолокатора з низько стабільними генераторними приладами.*

**Ключові слова:** низькостабільні генераторні прилади, адаптивний фільтр-коректор, ефективність систем селекції рухомих цілей.

### Вступ

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій.** В існуючих оглядових РЛС розвідки повітряного простору типу П-37, П-18, П-19, 5Н84А, в яких передавальні пристрої виконані на низькостабільних генераторних приладах, відхилення несучої частоти зондуєчих сигналів (ЗС) може досягати 10-20% (25...50 кГц) відносно ширини спектру сигналу. Внаслідок цього знижується ефективність системи селекції рухомих цілей (СРЦ) і коефіцієнт підперешкодової видимості ( $K_{пв}$ ) не перевищує 20 дБ, тоді як необхідна величина коефіцієнту підперешкодової видимості для РЛС, розгорнених на середньопересіченній місцевості, повинна складати 30...35 дБ [1].

Таким чином, для досягнення необхідного рівня ефективності роботи системи СРЦ, необхідно підвищити  $K_{пв}$  на 10...15 дБ.

Зменшити вплив нестабільності несучої частоти ЗС на ефективність роботи системи СРЦ можна за рахунок введення в тракт обробки прийнятих сигналів пристроїв, що забезпечують корекцію частотних характеристик приймального тракту [2 – 4].

Найбільш ефективним є використання адаптивних коригуючих пристроїв, що реагують на поточні зміни несучої частоти ЗС і перебудовують свої параметри в процесі роботи.

Для цього необхідно погоджувати процедуру вимірювання відхилення несучої частоти ЗС від номінального значення і процедуру настройки АЧХ коригуючого пристрою. При цьому залишається невивченим питання, яка повинна бути структура приймально-передаючого тракту РЛС, щоб за допо-

могою використання коригуючих пристроїв забезпечити необхідну ефективність роботи системи СРЦ локаторів з низькостабільними генераторними приладами.

**Мета статті:** обґрунтувати і запропонувати структуру захищеного від пасивних перешкод радіолокатора, передавальний пристрій якого виконаний на низькостабільному генераторному приладі.

### Виклад основного матеріалу

Тракт формування зондуєчих сигналів і обробки відбитих луна-сигналів з урахуванням впливу нестабільностей несучої частоти можна в загальному вигляді представити еквівалентною схемою, яка зображена на рис. 1.

Спектри  $S_1(f)$  ...,  $S_k(f)$  послідовно випромінюваних зондуєчих радіоімпульсів, як правило, схожі за формою, але розрізняються випадковими і незалежними відхиленнями несучої частоти від номінального значення ( $\Delta f_i$ ,  $\Delta f_k$  – відповідно в  $i$ -му та  $k$ -му тактах зондування).

При цьому в процесі віддзеркалення від підстиляючої поверхні, що має випадкову частотну характеристику  $K_{МО}(f)$ , частотні компоненти зондуєчих сигналів по-різному "зважуються" випадковою функцією  $K_{МО}(f)$ .

В результаті форма, положення і ширина гребнів спектру пасивних перешкод (ПП) можуть істотно змінюватися в процесі роботи РЛС, що і є причиною погіршення міжперіодної кореляції ПП, а отже, ефективності роботи системи СРЦ.

Зменшити вплив нестабільності несучої частоти ЗС на ефективність системи СРЦ можна за



Рис. 1. Еквівалентна схема радіолокаційного тракту

рахунок введення в тракт обробки прийнятих сигналів пристроїв, що забезпечують корекцію спектрів ПП. Їх частотні характеристики

$$K_i(f) \dots, K_k(f)$$

повинні забезпечувати точне поєднання добутоків

$$K_i(f) \cdot S_i(f), \dots, K_k(f) \cdot S_k(f)$$

для всіх спільно оброблюваних в системі СРЦ посилок. Така обробка дозволить на виході коригуючого пристрою відновити кореляцію луна-сигналів.

Описаний вище принцип пропонується реалізувати методом адаптивної корекції спектрів ехо-сигналів.

Суть методу в тому, що в кожному такті зондування здійснюється зсув частотної характеристики адаптивного фільтру-коректора (АФК) відносно несучої частоти  $f_0$  на величину частотного розстроювання ЗС в протилежному напрямі. В результаті на виході адаптивного коректора спектри оброблюваних луна-сигналів стають незмінними за формою та середньою частотою. Вказана властивість дозволяє при подальшій обробці (зокрема, в системі СРЦ) використовувати одні і ті ж спектральні складові луна-сигналів, що призводить до підвищення їх міжперіодної кореляції.

Залежно від форми зондуючих радіоімпульсів і інтенсивності ПП коефіцієнт підперешкодової видимості навіть для простих систем СРЦ теоретично може бути збільшений на 10...25 дБ.

Особливістю застосування АФК є те, що відбувається трансформація нестабільності несучої частоти ЗС в амплітудні міжперіодні флуктуації сигналу на виході фільтру.

Необхідно відзначити, що перебудова частотної характеристики фільтру-коректора здійснюється відповідно до величини виміряної нестабільності несучої частоти ЗС. Тому величина амплітудних міжперіодних флуктуацій сигналу на виході фільтру однозначно пов'язана з величиною нестабільності несучої частоти, що дає можливість врахувати зміну амплітуди луна-сигналів в подальшій обробці за допомогою пристрою нормування.

Застосування адаптивного фільтру-коректора є ефективним тільки при високій точності вимірювання нестабільності несучої частоти ЗС і високій точності

настройки АЧХ фільтру-коректора на нову частоту в кожному такті зондування.

Початковим параметром для висування вимог до точності роботи АФК є необхідна ефективність системи СРЦ. У РЛС огляду повітряного простору систему СРЦ можна вважати ефективною, якщо коефіцієнт підперешкодової видимості  $K_{пв}$ , не нижче 30...35 дБ.

Виходячи з цієї величини, можна оцінити [5] допустиме середньоквадратичне відхилення несучої частоти ехо-сигналів від номінального значення на вході системи СРЦ:

$$\sigma_{f,луна} \leq \frac{1}{\pi \cdot \tau_{имп} \cdot \sqrt{K_{пв}}} \quad (1)$$

Наприклад, для типової РЛС огляду повітряного простору П-37 з параметрами  $f_{ном} = 3 \cdot 10^9$  Гц  $\tau_{имп} = 2,7 \cdot 10^{-6}$  с та для  $K_{пв} = 35$  дБ допустиме середньоквадратичне відхилення несучої частоти луна-сигналів на вході системи СРЦ складає 2,1 кГц.

Середньоквадратичне відхилення несучої частоти луна-сигналів від номінального значення ( $\sigma_{f,луна}$ ) є загальною помилкою, що утворена помилками вимірювання частоти і помилками настройки АФК. Оскільки процеси вимірювання і настройки є незалежними, то значення сумарної середньоквадратичної помилки  $\sigma_{f,луна}$  визначатиметься середньоквадратичною помилкою (СКП) вимірювання відхилення несучої частоти  $\sigma_{\delta f}$  і СКП настройки адаптивного фільтру  $\sigma_{f,АФК}$  на нову частоту:

$$\sigma_{f,луна} = \sqrt{\sigma_{f,АФК}^2 + \sigma_{\delta f}^2}$$

У [6] показано, що процес вимірювання величини відхилення несучої частоти ЗС від номінального значення технічно можна реалізувати з СКП, величина якої не перевищує 1 кГц. З урахуванням досягнутої точності вимірювання нестабільності несучої частоти ЗС та допустимого значення середньоквадратичного відхилення частоти ЗС на вході системи СРЦ, середньоквадратична помилка настройки АЧХ адаптивного фільтру-коректора на нову частоту не повинна перевищувати 1,85 кГц.

Для перевірки можливості реалізації процесу автоматичної настройки частотної характеристики адап-

тивного фільтру-коректора на нову частоту проведено в загальному вигляді проектування цифрового фільтру, відповідного вимогам по швидкодії і точності настройки (СКП настройки частотної характеристики АФК на нову частоту не перевищує 1,85 кГц).

Проектування фільтру проводилося для простих сигналів без внутрішньоімпульсної модуляції. Моделювався трансверсальний фільтр з гаусовою АЧХ, лінійною фазовою характеристикою і з рівнем бічних пелюсток не вище -40 дБ.

Кількість і значення вагових коефіцієнтів фільтру розраховувалися за допомогою методу Паркса-Маккліллана [4].

Положення, форма АЧХ фільтру і рівень бічних пелюсток залежать від кількості вагових коефіцієнтів фільтру і їх значень [7].

Процес настроювання частотної характеристики АФК на нову частоту залежить від відповідного набору вагових коефіцієнтів фільтру (один набір вагових коефіцієнтів фільтру відповідає конкретному значенню нестабільності несучої частоти ЗС).

Кількість наборів вагових коефіцієнтів фільтру залежить від допустимої СКП настроювання частотної характеристики АФК на нову частоту, яка, у свою чергу, визначається дискретністю (Д) перебудови фільтру

$$\sigma_{f, \text{АФК}} = \Delta / 2 \cdot \sqrt{3}.$$

При  $\sigma_{f, \text{АФК}} = 1,85$  кГц допустима величина  $\Delta$  складе 6,29 кГц. Оскільки існує можливість виникнення додаткових помилок, то дискретність перебудови фільтру доцільно вибрати меншою, наприклад, рівною 5 кГц. З урахуванням цього для забезпечення можливості перебудови частотної характеристики фільтру в

межах  $\pm 50$  кГц необхідно 21 набір вагових коефіцієнтів фільтру.

Таким чином, при надходженні від вимірювача нестабільності несучої частоти ЗС інформації про величину відхилення несучої частоти ЗС з постійного запам'ятовуючого пристрою процесора буде вибиратися необхідний набір коефіцієнтів і здійснюватися операція згортки.

У постійний запам'ятовуючий пристрій слід записати таку кількість наборів вагових коефіцієнтів, яка дозволить відтворити з необхідною точністю необхідну частотну характеристику АФК в поточному такті зондування.

Технічну реалізацію АФК доцільно здійснити на базі цифрового сигнального процесора (DSP).

Серед великої кількості DSP слід зазначити процесор ADSP-TS001 сімейства TigerSHARC. Модель ADSP-TS001 має хороше відношення "ефективність/вартість".

При значних можливостях по обробці ціна процесора не перевищує 10\$. Реалізація описаних технічних рішень на основі процесора ADSP-TS001 забезпечить високу точність і швидкодію перебудови фільтру по частоті.

Таким чином, запропонований в [6] вимірювач нестабільності частоти ЗС і спроектований адаптивний фільтр-коректор дозволять технічно реалізувати метод адаптивної корекції спектрів луна-сигналів.

На рис. 2 представлена структурна схема приймально-передавального тракту РЛС, що дозволяє за допомогою корекції частотних характеристик приймального тракту знизити вплив нестабільності несучої частоти ЗС на ефективність системи СРЦ.



Рис. 2. Структура приймально-передавального тракту захищеного від ПП радіолокатора з низькостабільними генераторними приладами.

Технічна реалізація адаптивної корекції спектрів ПП в РЛС з низькостабільними генераторами припускає проведення незначних змін в структурі станції.

Рекомендації по зміні структури включають: введення каналу вимірювання нестабільності частоти ЗС і заміну узгодженого фільтру на адаптивний фільтр-коректор.

В цілому, технічна реалізація адаптивного фільтру-коректора дозволить значно понизити вплив нестабільності несучої частоти ЗС на ефективність систем СРЦ. Сумісне використання низькостабільних генераторних приладів і коригуючих пристроїв в приймальному тракті дозволить створити захищений від дії пасивних перешкод дешевий радіолокатор з високими експлуатаційними параметрами.

### Висновки

1. Зменшити вплив нестабільності несучої частоти ЗС на ефективність системи СРЦ можна за рахунок введення в тракт обробки прийнятих сигналів адаптивного фільтру-коректора, що реагує на поточні зміни несучої частоти ЗС і перебудовує свої параметри в процесі роботи.

2. Застосування в радіолокаторах адаптивного фільтру-коректора є ефективним за умови високоточного вимірювання відхилення несучої частоти ЗС від номінального значення і точного налагодження частотної характеристики фільтру-коректора на нову частоту. Необхідна точність вимірювання нестабільності частоти ЗС і точність налагодження АФК на нову частоту залежать від ефективності системи СРЦ, якої необхідно добитися при корекції спектрів луна-сигналів.

3. Реалізація в РЛС методу адаптивної корекції спектрів луна-сигналів технічно може бути здійснена на сучасній елементній базі і не призведе до помітного ускладнення станції.

### Список літератури

1. Литвинов В.В. Радиолокаторы систем контроля воздушного пространства: ретроспектива и современные проблемы интеграции и унификации / В.В. Литвинов // Прикладная радиоэлектроника. – 2004 – Т. 3, № 4. – С. 61-74.
2. Климченко В.И. Оценка эффективности систем СДЦ при введении в тракт обработки принятых сигналов "обужающего" фильтра / В.И. Климченко, А.А. Мальшев, А.В. Очуренко, С.И. Бурковский // Системы обработки информации: сб. науч. работ Харьковського університету Повітряних Сил. – № 10. – Х.: ХУПС, 2004. – С. 61-71.
3. Литвинов В.В. Уменьшение нестабильности несущей частоты радиоимпульсов посредством адаптивной коррекции спектров эхо-сигналов / В.В. Литвинов, В.И. Климченко, А.А. Мальшев, А.В. Очуренко // Системы обработки информации: сб. науч. работ Харьковського університету Повітряних Сил. – Вып. 1. – Х.: ХУПС, 2005. – С. 24-32.
4. Климченко В.И. Эффективность систем СДЦ при введении корректирующих фильтров в тракт обработки эхо-сигналов / В.И. Климченко, А.В. Очуренко // Системы обработки информации: сб. науч. работ Харьковського університету Повітряних Сил. – Вып. 5. – Х.: ХУПС, 2007. – С. 54-58.
5. Скольник М. Справочник по радиолокации. Т. 3 / М. Скольник. – М.: Сов. радио, 1979. – 528 с.
6. Климченко В.И. Измерение нестабильности несущей частоты радиоимпульсов малой длительности / В.И. Климченко, А.В. Очуренко, А.Н. Бовкун, В.Н. Курпий // Системы обработки информации: сб. науч. работ Харьковського університету Повітряних Сил. – Вып. 8. – Х.: ХУПС, 2006. – С. 32-37.
7. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е издание: пер. с англ. / Э.С. Айфичер., Б.У. Джервис – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 992 с.

Надійшла до редколегії 2.10.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, с.н.с. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І.Кожедуба, Харків.

### СТРУКТУРА ЗАЩИЩЕННОГО ОТ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ РАДИОЛОКАТОРА С НИЗКОСТАБИЛЬНЫМИ ГЕНЕРАТОРНЫМИ ПРИБОРАМИ

В.И. Климченко, А.В. Очуренко, А.Ю. Шрамков

*Проводится анализ необходимой точности работы адаптивного фильтра-корректора, при которой достижима высокая эффективность работы систем селекции движущихся целей. Разработан алгоритм работы адаптивного фильтра-корректора. Предложена структура фильтра, реализующего на устройствах цифровой обработки сигналов алгоритм адаптивной коррекции. Изложены рекомендации по изменению структуры приемопередающего тракта РЛС. Рассмотрен вариант структуры защищенного от пассивных помех радиолокатора с низкостабильными генераторными приборами.*

**Ключевые слова:** низкостабильные генераторные приборы, адаптивный фильтр-корректор, эффективность систем селекции движущихся целей.

### PROTECTED FROM PASSIVE JAMMING RADAR STRUCTURE WITH LOW-STABLE GENERATOR INSTRUMENTS

V.I. Klymchenko, A.V. Ochurenko, A.Yu. Shramkov

*The effect of non-stable carrier frequency of sensing signals on inter-period correlation of passive jamming was considered. The ways of radio-impulses non-stable carrier frequency reducing affect on efficiency of movable target selection system were determined. The analysis of adaptive filter-corrector required operation accuracy when high efficiency operation of movable targets selection system achieved was conducted. The recommendations about structure modification of radar transmitter-receiver duct are given. Proposed variant of protected from passive jamming radar structure with low-stable generator instruments.*

**Keywords:** low-stable generator instruments, adaptive filter-corrector, movable targets selection system.