

УДК 621.396.96

В.Ф. Зюкін, Д.Ю. Свистунов

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ОГЛЯДОВИХ РЛС ВІД АКТИВНИХ ІМПУЛЬСНИХ І ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД

Обговорюються можливості ефективного захисту приймального тракту оглядових РЛС від дії перешкод комбінованого типу. Під комбінацією перешкод мається на увазі сумісна дія активних імпульсних і пасивних перешкод різного походження. Аналізуються особливості побудови і оцінки ефективності пристрою придушення комбінованих перешкод, інваріантного по відношенню до моменту дії імпульсів хаотичної імпульсної перешкоди.

**Ключові слова:** активні імпульсні і пасивні перешкоди, захист від перешкод оглядової РЛС, пристрій придушення комбінованих перешкод.

### Вступ

Для оглядових РЛС РТВ, навіть в умовах мирного часу, притаманна робота при сумісній дії, активних імпульсних і пасивних перешкод різного походження. Пасивні перешкоди маскуючого типу (відбиття від місцевості, гідрометеорів) можуть мати на вході приймального тракту рівень 30...60 дБ (для бортових РЛС - до 80 дБ і більш) по відношенню до власного (стаціонарного теплового) шуму. Рівень луна-сигналу цілі (корисного сигналу, що зазвичай є пачкою імпульсів) - 10...30 дБ. Можливий рівень окремих відліків хаотичної імпульсної перешкоди (ХІП) значно вищий за енергію навіть накопиченої пачки сигналів цілі; він визначається динамічним діапазоном тракту обробки і може досягати 100...110 дБ.

Якісна доплерівська селекція когерентного пачкового сигналу цілі на тлі маскуючих пасивних перешкод можлива тільки при лінійній когерентній міжперіодній обробці коливань, що приймаються. Тому, амплітудне обмеження ХІП (для усунення енергетичної переваги останньої над корисним сигналом) можна здійснювати лише після тракту селекції рухомих цілей (СРЦ). Проте в процесі міжперіодної обробки пачок імпульсів, що спостерігаються в кожному з кілець дальності при огляді простору в ковзаючому вікні, одиночні імпульси ХІП в результаті багатократної міжперіодної затримки (за рахунок переміщення ковзаючого вікна) як би "розмножуються", тобто набувають пачкової структури (стають "цілеподібними"), що ускладнює їх подальшу селекцію.

Для того, щоб запобігти "розмноженню" ХІП, в [1, 2] пропонується для нових відліків пачок імпульсів, що поступають, в кожному кільці дальності (до подачі цих відліків на вхід багатовідвідної лінії затримки системи СРЦ, або в оперативний пристрій пам'яті, - ОПП) здійснювати статистичний аналіз. Оцінюється "нев'язка" поточного відліку і екстрапольованого (до даного моменту часу) значення пасивної перешкоди (це "зважена" сума попередніх

відліків кільця дальності), що дозволяє виявити відліки, "уражені" ХІП.

Номер ураженого відліку до ( $k=1, 2 \dots, N$ ) в оброблюваній пачці з  $N$  імпульсів фіксується, після чого "поточний" (що перебудовується в кожному періоді проходження) алгоритм оптимальної міжперіодної обробки (для СРЦ) формується у вигляді відношення правдоподібності

$$L_k(U) = W_{kc}(U) / W_k(U), \quad (1)$$

де  $U = \|u_i\|$  ( $i = 1, \dots, N$ ) –  $N$ -мірний вектор-стовпець відліків комплексних амплітуд  $u_i$  вхідних впливів (пачки імпульсів у даному кільці дальності), що являє собою статистику спостереження;  $W_{kc}(U)$  і  $W_k(U)$  – умовні  $N$ -мірні щільності розподілу ймовірності випадкових значень компонент комплексного вектору  $U$  за умови, що вхідний вплив включає адитивну суміш коливань сигналу і перешкод (шум + пасивні перешкоди + ХІП) або тільки перешкод відповідно, а імпульс ХІП в поточному періоді проходження займає позицію з номером  $k$ . При статистиці Гауса вхідних впливів та  $N$ -мірному очікуваному (опорному) сигналі цілі  $S$  (луна-сигнал представляється у вигляді пачки когерентних флюктуючих радіоімпульсів) достатня статистика (1) може характеризуватися [3] модульним значенням вагової суми

$$|\ln[L_k(U)]| = |U^T \cdot R_k^*|, \quad (2)$$

яка реалізує зважене сумування комплексних відліків  $u_i$   $N$ -мірного вектора  $U$  ( $U^T$  – транспоноване значення) вхідного процесу за допомогою  $N$ -мірного комплексно спряженого ( $R_k^*$ ) вагового вектора

$$R_k = \Phi_k^{-1} \cdot S. \quad (3)$$

Останній визначається оберненою ( $\Phi_k^{-1}$ ) кореляційною матрицею  $\Phi_k$  суми кореляційних матриць шуму, пасивної перешкоди і ХІП (імпульс ХІП займає  $k$ -ту позицію), а також вектор-стовпцем очікуваного сигналу  $S$ . Можна показати, що при високому очікуваному рівні ХІП  $k$ -й елемент вагового вектора (3) обертається в нуль, т.ч. вагова сума (2) комплексних відліків  $u_i$  вектора  $U$  записується як

$$|\ln[L(U)]| = |\sum \Phi_i \cdot u_i|, \quad (4)$$

де  $\varphi_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) – комплексні компоненти вектора  $R_k^*$ , причому  $\varphi_k = 0$  ( $u_k$ -й елемент вхідної вибірки з аналізу виключається). Якщо імпульс ХІП на  $m$ -й позиції, то замість (4) вагова сума

$$|\ln[L_m(U)]| = |\sum \varepsilon_i \cdot u_i|, \quad (5)$$

т.ч. згідно (3) компоненти вектора  $R_m^*$  не дорівнюють компонентам вектора  $R_k^*$ :  $\varepsilon_i \neq \varphi_i$ , а з обробки виключається  $u_m$ -й ( $\varepsilon_m = 0$ ) елемент вхідної вибірки.

Таким чином, обробка виразу (1) зводиться до усунення з вхідної вибірки відліків, "уражених" ХІП та реалізації лінійного фільтра СРЦ (когерентна режекція пасивної перешкоди і когерентне накопичення корисного сигналу) на основі зваженого сумування  $N-1$  відліків, що залишилися згідно співвідношень (3), (4), (5).

Якщо ХІП відсутня, то залежність наведених алгоритмів від номера позиції  $k$  виключається. Наприклад, замість (4), (5) користуватимемося записом

$$|\ln[L(U)]| = |\sum b_i \cdot u_i|, \quad (6)$$

де  $b_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) – комплексні компоненти вектора  $R = \Phi^{-1} \cdot S$ , який, на відміну від (3), визначається кореляційною матрицею  $\Phi$  суми кореляційних матриць тільки шуму і пасивної перешкоди. Отримуємо "звичайний" (назвемо його основним) фільтр (або канал) СРЦ на основі зваженого сумування всіх  $N$  відліків пачки імпульсів.

Перебудова опорного вектора у кожному періоді (3) алгоритму вагового сумування (2) при наявності ХІП повинна проводитися автономно (незалежно) в кожному кільці дальності. Щоб не перебудувати алгоритм СРЦ, можна у момент появи відліку з ХІП замінювати його в ОПП відліком, що містить екстрапольоване значення пасивної перешкоди. Проте спотворення вхідної вибірки за рахунок внесення шумів, обумовлених процедурою екстраполяції відліків, може погіршити показники СРЦ.

Представлені в [1, 2] алгоритми ефективні при достатньо надійному виявленні в оброблюваній пачці з  $N$  імпульсів номера позиції  $k$ , "ураженої" ХІП, що обумовлює високий рівень вимог до достовірності початкових статистичних даних про вхідні впливи.

Розглянемо альтернативні алгоритми міжперіодної обробки, інваріантні до моменту дії імпульсу ХІП. Такі алгоритми можуть мати ряд переваг в порівнянні із запропонованими в [1, 2].

### Пристрої захисту РЛС від пасивних перешкод, інваріантні по відношенню до моменту дії імпульсів ХІП

Вважатимемо, що ОПП заповнюється комплексними відліками  $u_i$  (шина "вхід СРЦ" на рис. 1), кожен з яких може бути "уражений" імпульсом ХІП з рівною імовірністю. При цьому нехтуємо ймовірністю того, що пачка з  $N$  імпульсів довільного кільця дальності може бути уражена більш ніж одним імпульсом ХІП.

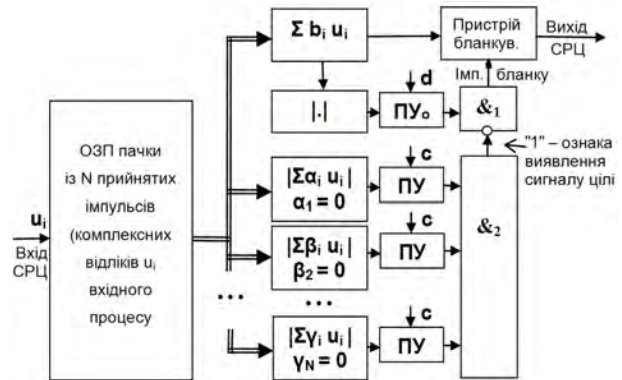


Рис. 1. Варіант системи захисту РЛС від активних імпульсних і пасивних перешкод

Тоді варіант системи СРЦ, інваріантної по відношенню до моменту дії імпульсів ХІП, може бути синтезований стосовно моделі розрізнення трьох (двох альтернативних і одної основної) статистичних гіпотез:  $H_0$  - вхідна ( $N$ -мірна) вибірка містить тільки стаціонарні початкові перешкоди (адитивну суміш коливань шуму і корельованої пасивної перешкоди);  $H_x$  - окрім наявності початкових перешкод один з відліків "уражений" імпульсом ХІП;  $H_c$  (основна гіпотеза) - окрім початкових перешкод присутній пачковий (2 та більш імпульсів) корисний сигнал (можливе поєднання імпульсу ХІП і корисного сигналу). Рішення на користь третьої (основної) гіпотези  $H_c$  можна знайти шляхом зіставлення результатів рішень (1) при всіх можливих значеннях  $k$ , й рішення (6) (імпульс ХІП у спостережуваній пачці відсутній). На рис. представлений варіант системи СРЦ, що синтезована стосовно до задачі розрізнення наведених гіпотез. Структура цієї системи інваріантна по відношенню до моменту дії імпульсів ХІП, що дозволяє виключити процедури виявлення імпульсної перешкоди і використовувати єдиний алгоритм міжперіодної обробки незалежно від номера періоду проходження і кільця дальності.

Система СРЦ побудована з використанням підключених паралельно до ОПП  $N+1$  блоків вагового сумування. У верхньому блоці розраховуються лінійні значення вагової суми (6)  $\sum b_i u_i$  всіх  $N$  відліків (реалізується основний фільтр або канал СРЦ), які транзитом через пристрій бланкування поступають на шину "Вихід СРЦ" для подальшої (когерентної або некогерентної) обробки сигналів. Паралельно модульні значення цієї вагової суми  $|\sum b_i u_i|$  порівнюються в пороговому пристрої ПУ<sub>0</sub> з порогом "d" для формування ознаки виявлення сигналу цілі або імпульсу ХІП. Значення "d" встановлюється таким, щоб шуми і пасивні перешкоди що піддавались режекції та пройшли через основний фільтр СРЦ, поріг не перевищували, а при наявності у вхідному впливу також корисного сигналу (з урахуванням його накопичення в основному фільтрі СРЦ) поріг перевищувався в результаті чого формується ознака виявлення (сигнал з логічною ознакою "1"). Така ж

ознака, очевидно, з'явиться й при ураженні вхідної оброблюваної вибірки потужним імпульсом ХІП.

Сигнал з вказаною ознакою впливає на прямий (лівий) вхід схеми співпадіння  $\&_1$ , яка керує пристроєм бланкування. Цей пристрій (за наявності імпульсу бланка, який відповідає логічній "1" на виході  $\&_1$ ) "викреслює" з вибірки на виході суматора  $\Sigma b_i u_i$  відліки, уражені ХІП, й пропускає решту відліків без змін. Для такого викреслювання необхідно, щоб в моменти дії імпульсів ХІП, окрім логічної "1" на лівому вході схеми  $\&_1$  на її нижньому (інверсному) вході був присутній логічний "0". Після інверсії цього "0" в "1" схема співпадіння  $\&_1$  формує імпульс бланка.

Для управління схемою  $\&_1$  по інверсному вході використовуються N нижніх (підключених паралельно до ОПП) блоків, в яких здійснюються операції вагового сумування вигляду (4), (5):

$$|\Sigma \alpha_i u_i| (\alpha_1=0), |\Sigma \beta_i u_i| (\beta_2=0), \dots, |\Sigma \gamma_i u_i| (\gamma_N=0). \quad (7)$$

У кожному з N блоків (7) реалізуються операції (2) з врахуванням (3), тобто формуються підканали (або допоміжні фільтри) СРЦ з розрахунком на виявлення корисного сигналу або імпульсу ХІП на основі когерентної обробки пачки з N-1 імпульсів. Пороги "с" порогових пристроїв ПП (як і поріг "d" порогового пристрою ПУ<sub>0</sub>) встановлюються такими, щоб шуми і пасивні перешкоди, що пройшли через відповідні підканали СДЦ (7) (з врахуванням придушення останніх) ці пороги не перевершували. За наявності ж в довільному підканалі СДЦ корисного сигналу або імпульсу ХІП поріг "с" буде перевищений, внаслідок чого на виході відповідного ПУ формується сигнал ознаки виявлення (логічна ознака "1"), що поступає на вхід схеми співпадіння  $\&_2$ .

Головною особливістю роботи пристрою (рис. 1) є те, що за наявності пачкового корисного сигналу (2 і більш імпульсів в пачці) перевищення порогу "с" очікується у всіх підканалах СРЦ, на виходах ПП яких будуть сформовані ознаки виявлення у вигляді логічних "1". При цьому на виході схеми співпадіння  $\&_2$  формується ознака виявлення сигналу цілі у вигляді логічної "1". При наявності одиночного імпульсу ХІП перевищення порогу "с" очікується не у всіх підканалах СРЦ. Це обумовлено тим, що за наявності імпульсу ХІП на будь-якій позиції завжди знайдеться підканал СРЦ, в якому ця позиція з обробки виключена. Формування ознаки виявлення сигналу цілі буде неможливим. Якщо ж разом з одиночним імпульсом ХІП присутній і пачковий корисний сигнал, то ознака виявлення сигналу цілі у вигляді логічної "1" буде сформована, що дозволяє виключити помилкове бланкування сигналу цілі. У результаті принцип функціонування даної системи захисту РЛС від активних імпульсних і пасивних перешкод можна пояснити таким чином.

За наявності на її вході шуму і корельованої пасивної перешкоди (справедлива гіпотеза  $H_0$ ) залишки перешкод на виходах всіх N+1 блоків вагового сумування не перевищують пороги "d" та "с". На всі входи схеми співпадіння  $\&_2$  і на прямий (лівий) вхід схеми

співпадіння  $\&_1$  подаються логічні "0". Ознака виявлення сигналу цілі у вигляді логічної "1" на виході схеми співпадіння  $\&_2$  не формується. Стан логічних входів схеми співпадіння  $\&_1$ : зліва - логічний "0"; знизу, після інверсії - логічна "1". Імпульс бланка не формується; шуми і залишки придушених основним фільтром СРЦ пасивних перешкод безперешкодно проходять на вихід пристрою для подальшої обробки.

За наявності (на вході системи захисту від комбінованих перешкод) шуму, корельованої пасивної перешкоди і потужного імпульсу ХІП (справедлива гіпотеза  $H_x$ ) "залишки" перешкод на виходах всіх N+1 блоків вагового сумування перевищують пороги "d" та "с". Виключенням буде лише k-й підканал СРЦ, в якому k-й відлік, уражений імпульсом ХІП, з обробки виключений. У результаті ознака виявлення сигналу цілі у вигляді логічної "1" на виході схеми співпадіння  $\&_2$  (як і для попередньої гіпотези) не формується. Проте стан логічних входів схеми співпадіння  $\&_1$  міняється: зліва тепер - логічна "1"; знизу, після інверсії - також логічна "1". Формується імпульс бланка, що перешкоджає проходженню на вихід пристрою СДЦ відліків, "уражених" імпульсом ХІП. Якщо вхідна пачка імпульсів обробляється в режимі "ковзаючого вікна", то бланкування продовжуватиметься, поки відлік, "уражений" ХІП, не вийде за межі "вікна".

За наявності (у вхідному сигналі) шуму, корельованої пасивної перешкоди і пачкового корисного сигналу (справедлива гіпотеза  $H_c$ ) останній накопичується як в основному фільтрі СРЦ (6), так і у всіх N допоміжних фільтрах (7). В результаті на виході порогового пристрою ПП<sub>0</sub> та всіх (без виключення) виходах N порогових пристроїв ПП формуються логічні ознаки "1". При такому поєднанні ознак імпульс бланка не формується. Відліки, що містять корисний сигнал, безперешкодно поступають на шину "Вихід СРЦ" для подальшої обробки.

Розглянута ситуація не міняється, якщо разом з пачковим корисним сигналом присутній імпульс ХІП. Подібне поєднання вхідних впливів приводить до надійнішого виявлення сигналів цілей.

Показники ефективності даного пристрою визначаються його функціональним призначенням, яке зводиться до режектування пасивної перешкоди, попередньому накопиченню сигналів цілі і бланкуванню імпульсів ХІП. Заздалегідь накопичені (у основному фільтрі СРЦ) корисні сигнали повинні безперешкодно поступати на вихід пристрою. Якість режекції пасивної перешкоди і накопичення корисного сигналу, визначуване структурою основного фільтру СРЦ (6), залежить від статистичних характеристик вхідних впливів, об'єму вибірки N, і може оцінюватися за допомогою відомих методів [3]. До нових завдань тут можна віднести розрахунок ймовірності придушення (бланка) імпульсів ХІП і ймовірність помилкового бланкування (самобланкування) корисного сигналу. Спрощений розрахунок ймовірності придушення ХІП, стосовно найбільш складної

ситуації - великої потужності імпульсних впливів - зводиться до наступного. Вважаємо, що в такій ситуації поріг ПП<sub>0</sub> "d" й пороги ПП "с" (окрім порогу ПП k-того допоміжного фільтру) будуть перевищені, що приведе до бланка ХІП. Проте імпульс бланка не сформується, якщо в k-ому підканалі СРЦ шуми і залишки пасивної перешкоди (сумарною потужністю  $q^2$ ) перевищать поріг "с". Ймовірність цієї події (при релєєвських розподілах вихідних відгуків фільтрів СРЦ) буде дорівнювати  $F = \exp(-c^2 / 2q^2)$ . Тому ймовірність придушення потужного імпульсу ХІП

$$P = 1 - F = 1 - \exp(-c^2 / 2q^2). \quad (8)$$

Для збільшення цієї ймовірності необхідно підняти рівень порогу "с".

Самобланкування корисного сигналу матиме місце, якщо суміш залишків перешкод і накопиченого сигналу на виході основного фільтру СРЦ перевищить поріг "d", але енергії цього сигналу буде недостатньо, щоб одночасно у всіх підканалах СРЦ був перевищений поріг "с". Для зменшення ймовірності самобланкування слід збільшувати поріг "d" і знижувати поріг "с", що вступає в суперечність з попередньою вимогою (8). Збільшення порогу "d" приводить також до зменшення ймовірності придушення імпульсів ХІП середньої інтенсивності.

Шляхом сумісної оптимізації рівнів порогів "с" і "d" можна добитися бажаного співвідношення між ймовірністю придушення імпульсів ХІП і ймовірністю самобланкування корисного сигналу. Необхідні оцінки даних показників якості і рекомендації по вибору порогів можуть бути отримані при завданні багатовимірної щільності розподілу вихідних відгуків всіх фільтрів СРЦ з урахуванням їх взаємної кореляції, або визначені шляхом моделювання.

## Висновки

Розглянута система захисту РЛС від активних імпульсних і пасивних перешкод (рис. 1) може використовуватися як проміжний або кінцевий елемент

загального тракту міжперіодної обробки радіолокаційних сигналів. Ефективне придушення комбінованих перешкод забезпечується за рахунок сумісного використання процедур бланкування ХІП і частотної режекції пасивної перешкоди. Надійність бланкування імпульсної перешкоди підвищується із збільшенням її рівня, причому якість придушення пасивної перешкоди не залежить від наявності ХІП. Алгоритми обробки інваріантні по відношенню до моментів дії імпульсів ХІП, що виключає необхідність їх постійної перебудови в різних кільцях дальності і в різних періодах послідовних зондуючих імпульсів.

Управління режимами функціонування і перебудова параметрів системи можуть здійснюватися шляхом зміни рівнів лише двох порогів ("с" і "d" в основному і допоміжних каналах фільтрації), що дозволяє змінювати показники якості захисту від перешкод в широких межах і, за відсутності ХІП, легко трансформувати даний пристрій в "звичайну" систему СРЦ.

## Список літератури

1. Обнаружение в обзорных РЛС эхо-сигналов целей на фоне активных импульсных и пассивных помех с произвольным распределением интенсивности / В.В. Литвинов, В.Ф. Зюкин, А.А. Грызо, А.В. Сидоренко // *Моделирование та інформаційні технології*. – К.: ППМЕ НАН України, 2005. – Вып. 32. – С. 137-152.

2. Помехозащита импульсных обзорных РЛС при совместном воздействии пассивных и активных импульсных помех / В.В. Литвинов, В.Ф. Зюкин, А.А. Грызо, А.В. Сидоренко // *Сборник докл. 2 между. радиоэлектронного форума МРФ- 2005. Международная конференция «Системы локации и навигации», ХНУРЭ, 2005.* – С. 139-142.

3. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Надійшла до редколегії 8.12.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. В.В. Літвінов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОБЗОРНЫХ РЛС ОТ АКТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ И ПАСИВНЫХ ПОМЕХ

В.Ф. Зюкин, Д.Ю. Свистунов

*Обсуждаются возможности эффективной помехозащиты приемного тракта обзорных РЛС от мешающих воздействий комбинированного типа. Под комбинацией помех подразумевается совместное воздействие активных импульсных и пассивных помех различного происхождения. Анализируются особенности построения и оценки эффективности устройства подавления комбинированных помех, инвариантного по отношению к моменту воздействия импульсов хаотической импульсной помехи.*

**Ключевые слова:** активные импульсные и пассивные помехи, помехозащита обзорной РЛС, устройство подавления комбинированных помех.

## WAYS PERFECTION OF THE SURVEY RADARS DEFENCE SYSTEMS FROM ACTIVE IMPULSIVE AND PASSIVE HINDRANCES

V.F. Zyukin, D.Y. Svistunov

*Discusses possibilities of effective survey radars receivers defence from the hindrances of the combined type. Combination of hindrances implied joint influence of active impulsive and passive hindrances of different origin. The device construction features and efficiency suppression of the combined hindrances are analysed. Proposed device which invariant to a moment influence impulses of chaotic impulsive hindrance.*

**Keywords:** active impulsive and passive hindrances, protecting from the hindrances of survey radar, device of suppression of the combined hindrances.