

УДК 621.396.967.2

А.М. Булай

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків***МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ ВТОРИННОЇ РАДІОЛОКАЦІЇ***Розглянуто деякі методи підвищення завадостійкості систем вторинної радіолокації, які ґрунтуються на синхронних мережах розглядаємих систем та проведена оцінка завадостійкості цих методів.**завадостійкість систем ВРЛ; синхронна мережа систем ВРЛ***Вягуп**

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Поряд із засобами первинної радіолокації важливе місце в Об'єднаній цивільно-військовій системі організації повітряного руху України займають засоби вторинної радіолокації (ВРЛ). Вони були та залишаються основними джерелами обміну необхідною та додатковою інформацією між наземними системами та ЛА. Системи ВРЛ складаються із запитувача та літакового відповідача (ЛВ). За принципами побудови відповідача та системи загалом системи ВРЛ відносяться до [1]:

- систем, обслуговуючих сигнал запиту (СЗ);
- систем масового обслуговування (СМО) з відмовами;
- несинхронних мереж.

Ці принципи побудови систем ВРЛ та використання відповідачем всеспрямованої антени є серйозною перепорою для функціонування системи ВРЛ при наявності внутрішньосистемних та навмисних корельованих завад (НКЗ), що суттєвим чином знижує завадостійкість таких систем.

Таким чином, пошук методів захисту систем ВРЛ від НКЗ є актуальним.

Метою роботи є розробка та аналіз методів підвищення завадостійкості систем вторинної радіолокації.

Ояновна чайгина

Відомо, що основою подавлення завад є розбіжності між корисним сигналом і завадою. Побудова існуючих систем ВРЛ, як показано вище, виключає розбіжності між корисним сигналом і завадою ні за простором, ні за часом.

Створення просторових розходжень між сигналами систем ВРЛ і НКЗ, хоча й можливо, однак приводить до значних матеріальних витрат і приводить до складності функціонування таких систем. Іншим методом створення розбіжностей між корисними сигналами та НКЗ є часові розбіжності.

Пошук часових розбіжностей між корисними сигналами та НКЗ приводить, як показано в [1], до зміни принципу організації мережі систем ВРЛ. Перехід від несинхронної мережі до синхронної мережі (СМ) систем ВРЛ дозволяє штучно створити часові розбіжності між корисними СЗ та завадами [2]. Часові розходження між корисними СЗ та НКЗ виявляються в часі надходження. Дійсно, тому що шкала часу (ШЧ) ЛВ погоджена зі ШЧ всіх елементів СМ систем ВРЛ, то корисні СЗ надходять на відповідач у синхронні, а НКЗ – у несинхронні моменти часу.

Таким чином, перехід до СМ систем ВРЛ має переваги [1 – 3]. Зокрема, це дозволяє перевести НКЗ у несинхронну заваду, методи захисту від якої досить вивчені.

СМ систем ВРЛ дозволяє перейти від принципу обслуговування СЗ до принципів обслуговування абонента (запитувача) або обслуговування мережі у цілому. У системах ВРЛ, що реалізують перший принцип у ЛВ, обслуговується конкретний запитувач, а в системах ВРЛ, реалізованих на другому принципі – обслуговуються всі запитувачі мережі.

Реалізація першого принципу здійснюється на базі запитувальних систем ВРЛ, часові процеси усіх запитувачів та відповідачів здійснюються на синхронних ШЧ [3]. Реалізація другого принципу здійснюється на базі запитувальних систем ВРЛ з відстроєною відповіддю (ВВ), часові процеси усіх запитувачів та відповідачів за каналом відповіді здійснюються на синхронних ШЧ [2]. У системах ВРЛ, реалізованих за зазначеними принципами, вдається виключити можливість обслуговування НКЗ ЛВ, а також значно знизити інтенсивність потоку сигналів відповіді (СВ).

Необхідно відзначити, що використання СМ у запитувальних системах ВРЛ дозволяє перейти від СМО з відмовами до СМО з очікуванням. У цьому випадку за час спостереження ЛА T_n ЛВ може обслужити $N = \lfloor T_n / T_0 \cdot k \rfloor$ запитувачів, де k – необхідне число відповідей запитнику, які необхідні для виконання критерію початку пачки.

У системі ВРЛ з ВВ час обслуговування всіх СЗ, що надійшли на інтервалі часу аналізу T_0 , вибирається з умови $T_{об} = T_0 - t_p(t)$, де $t_p(t)$ – відомий, постійно змінний, часовий інтервал. Таким чином, у таких системах, незалежно від числа СЗ на часовому інтервалі аналізу, вони обслуговуються одночасно в момент часу, наведеному вище. При такій реалізації керування потоками сигналів кодуванню підлягає часовий інтервал $t_p(t)$, у той час як у першому методі керування потоками в СМ запитувальних систем ВРЛ – T_0 . Незалежно від числа запитувачів число СВ ЛВ при методі з ВВ буде визначатися часовим інтервалом аналізу. Це значно знижує потік внутрішньосистемних завад у каналі відповіді. Оскільки обслуговуванню підлягає будь-який СЗ, дешифрований у межах інтервалу часу аналізу, то при роботі системи ВРЛ з ВВ можливе одержання необхідної інформації від ЛВ як за своїм СЗ, так і за СЗ будь-якого запитувача. Це обумовлено тим, що даний метод реалізує принцип обслуговування мережі. Така побудова систем ВРЛ знімає проблему реалізації розосереджених систем ВРЛ, а також часового узгодження сигналів, що надходять по системах первинної та вторинної локації.

Розглянемо зазначені методи створення завадостійких систем ВРЛ, реалізованих на базі СМ, більш докладно.

Запитувальні системи ВРЛ, реалізовані на базі СМ із обслуговуванням абонента, дозволяють формувати потоки сигналів ВРЛ без взаємодії, що приводить до усунення накладення СВ при достатніх відстанях між повітряними цілями, тобто при вико-

нанні умови $\Delta R / c > t_c$, де ΔR – мінімально можлива відстань між ЛА, t_c – максимальна тривалість сигналу ВРЛ, і, як наслідок, до підвищення завадостійкості систем ВРЛ. Однак у таких системах не усунута, хоча та значно ослаблена, можливість постановки навмисних хаотичних імпульсних завад (ХІЗ).

Дослідимо завадостійкість СМ систем ВРЛ, для чого розглянемо особливості впливу завад на прийом СЗ, особливості утворення хибних тривог. Сумарний потік сигналів являє собою суму потоків сигналів ВРЛ із інтенсивністю λ_1 і потоку імпульсів ХІЗ з інтенсивністю λ_0 .

При дії на вхід апаратури обробки сигналів ВРЛ одночасно ХІЗ і ПСЗ будуть спостерігатися такі явища, що приводять до виключення або помилкового формування СВ:

- високочастотне подавлення сигналів ВРЛ даного об'єкта при збігу в часі імпульсів ХІЗ та імпульсів ПСЗ і несприятливих фазових співвідношеннях;
- подавлення сигналів ВРЛ у результаті інерційності схем обробки прийнятих сигналів;
- формування СВ при утворенні хибної тривоги першого роду;
- формування СВ при утворенні хибної тривоги другого роду.

Розрахунки ймовірності цих подій, методика яких достатньо детально викладена в [1], представлені на рис. 1.

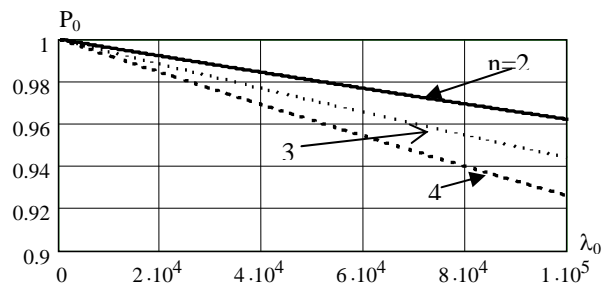


Рис. 1. Залежність $P_0=f(\lambda_0)$

Як бачимо з рис. 1, створення СМ дозволяє значно збільшити завадостійкість ЛВ систем ВРЛ. Дійсно, вплив навмисної некорельованої завади інтенсивністю 100000 приводить до зниження коефіцієнта готовності (КГ) ЛВ до величини 0,927.

Апаратура обробки сигналів ВРЛ реалізує алгоритм виявлення пачки сигналів, що надходять за правилом “ k з M ”. У цьому випадку загальну ймовірність визначення координат повітряної цілі системою ВРЛ, реалізованою на базі СМ, можна записати як

$$P_c = \sum_{i=k}^M C_M^i P_0^i (1 - P_0)^{M-i} \quad (1)$$

Розрахунки за виразом (1) представлені на рис. 2 при значності коду $n = 2$, що характерно для систем ВРЛ країн – членів НАТО, для різних критеріїв обробки.

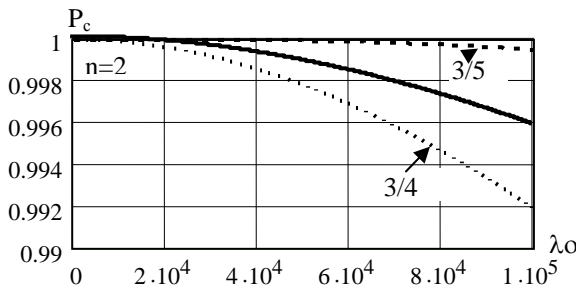


Рис. 2. Залежність $P_c=f(\lambda_0)$

При цьому слід сказати, що значення M узятю навмисно малим, тому що при більших M ймовірність P_c практично дорівнює одиниці. Як бачимо із представлених залежностей, вплив навмисної некорельованої завади на завадостійкість СМ ВРЛ значно ослаблена в порівнянні з існуючими ВРЛ [1].

Розглянемо суть методу ВВ. Запитувачі систем ВРЛ, реалізовані за даним методом, роблять огляд простору відомим методом. СЗ приймаються та дешифруються відповідачем протягом деякого часового інтервалу аналізу T_a , який враховує фактор необхідного числа випромінювань СВ. Таким чином, розглянутий метод, за рахунок реалізації принципу відповіді не на кожен СЗ, а на певне число СЗ, що надійшли протягом інтервалу часу аналізу T_a , одним СВ всім запитувачам, дозволяє зняти проблему пропускну здатності системи ВРЛ. При цьому необхідно відзначити, що одночасно з підвищенням пропускну здатності системи зростає і її завадостійкість, тому що ймовірність прийому неспотвореного СЗ на інтервалі часу T_a значно вище, у порівнянні з існуючим методом обробки СЗ.

Оцінимо завадостійкість запитувальних систем ВРЛ, що використовують метод ВВ.

Нехай на вхід ЛВ надходить ХІЗ інтенсивністю λ_0 , ПСЗ, що вимагає випромінювання СВ, інтенсивністю λ_1 , і ПСЗ, випромінених по бічних пелюстках ДС запитувача, інтенсивністю λ_2 . При цьому припустимо, що тривалість імпульсів потоку ХІЗ і ПСЗ однакова та дорівнює тривалості імпульсів корисного сигналу τ_0 .

Спільна дія ХІЗ і ПСЗ приводить до високочастотного подавлення окремих імпульсів ХІЗ та ПСЗ при несприятливих фазових співвідношеннях, у результаті чого зменшується інтенсивність ПСЗ і ХІЗ.

Ймовірність того, що хоча б один імпульс ХІЗ збіжиться за часом з імпульсом ПСЗ і подавить його, дорівнює: $P_p = \gamma[1 - \exp(-\lambda_0\tau_0)]$.

З урахуванням P_p інтенсивності потоків λ_1 та λ_2 можна визначити як:

$$\lambda_1^1 = \lambda_1(1 - P_p)^n; \quad \lambda_2^1 = \lambda_2(1 - P_p)^n.$$

Ймовірність того, що хоча б один СЗ потрапить у випереджальний інтервал і подавить СЗ даної системи ВРЛ за рахунок накладення імпульсів ПСЗ, визначається як $P_1 = 1 - \exp(-\lambda_1^1 t_1)$.

Інтенсивність потоку помилкових n -імпульсних кодів, утворених з ХІЗ, можна визначити з такого співвідношення: $\lambda_{\text{л}} = n\lambda_0^n(\tau_0 - \tau_c)^{n-1}$, де τ_c – задана величина селекції імпульсів за тривалістю.

Ймовірності того, що хоча б один СЗ потрапить у випереджальний інтервал і подавить дешифрацію СЗ даної системи ВРЛ за рахунок часу прийому імпульсів ПСЗ, випромінених по бічних пелюстках ДН запитувача, а також утворених з ХІЗ, обчислюються відповідно як

$$P_2^1 = \lambda - \exp(-\lambda_2^1 t_2) \quad \text{і} \quad P_2^2 = 1 - \exp(-\lambda_{\text{л}} t_1).$$

Сумарна ймовірність подавлення СЗ даної системи ВРЛ за рахунок часу прийому сигналів, випромінених по бічних пелюстках ДН антени запитувача та утворених з ХІЗ помилкових СЗ, визначається як: $P_2 = 1 - (1 - P_2^1)(1 - P_2^2)$.

Ймовірність того, що хоча б один імпульс із потоку ХІЗ і ПСЗ накладеться на імпульс СЗ даної системи ВРЛ і подавить його, становить $P_{10} = \gamma[1 - \exp(-\lambda_c \tau_0)]$, де $\lambda_c = \lambda_0 + \lambda_1^1 + \lambda_2^1$.

З урахуванням n -імпульсного СЗ ймовірність подавлення СЗ складе $P_3 = 1 - (1 - P_{10})^n$.

Ймовірність подавлення СЗ даної системи ВРЛ у результаті появи на позиції сигналу подавлення помилкового імпульсу подавлення, утвореного з завад, можна записати як: $P_4 = (1 - P_p)P_{10}$.

Ймовірність однократної дешифрації СЗ можна визначити як

$$P_a = \prod_{i=1}^4 (1 - P_i). \quad (2)$$

Розрахунки за виразом (2) представлені на рис. 3 для $n=2$. Як бачимо з рис. 3, при збільшенні інтенсивності ПСЗ ймовірність неспотвореного прийому СЗ зменшується та досягає 0,65 при $\lambda_1=5000$ і $\lambda_0=20000$ та 0,58 при $\lambda_1=5000$ і $\lambda_0=40000$. Розрахунки зроблені при $\lambda_2=5 \lambda_1$. Ймовірність випромінювання відповіді ЛВ розглянутої запитувальної системи ВРЛ, з урахуванням інтервалу часу аналізу, можна визначити з такого співвідношення:

$$P_o = 1 - (1 - P_a)^M. \quad (3)$$

Розрахунки за виразом (3) представлені на рис. 4 для $n=2$ при $M=3$.

Як бачимо із представлених залежностей, при $M=3$ коефіцієнт готовності ЛВ дуже суттєвий для розглянутих інтенсивностей потоків СЗ, що вказує на високу завадостійкість запропонованого методу реалізації систем ВРЛ. Наведені залежності вказують на істотну залежність КГ ЛВ запитувальних систем ВРЛ із ВВ від n та M .

Ймовірність помилкового випромінювання СВ ЛВ, за рахунок утворення помилкового СЗ із ХІЗ і відсутності на часовому інтервалі T_a дійсного СЗ, можна визначити з такого співвідношення

$$F = P_{\text{ол}}(1 - P_o), \quad (4)$$

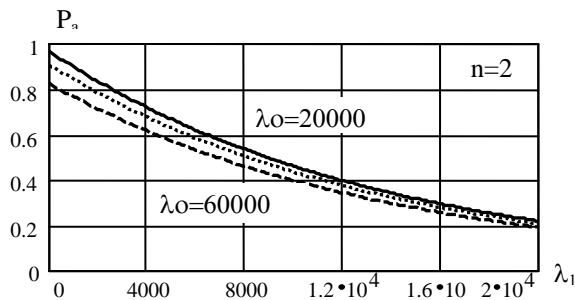


Рис. 3. Залежність $P_a = f(\lambda_1)$

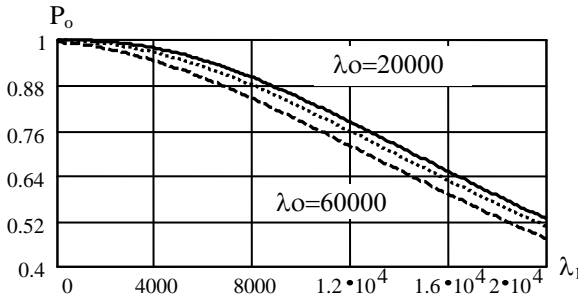


Рис. 4. Залежність $P_o = f(\lambda_1)$

де $P_{ол}$ визначається як

$$P_{ол} = 1 - (1 - P_2^2)^M \quad (5)$$

Розрахунки за виразом (4) з урахуванням (5) для різних n та M показують, що запропонований метод ВРЛ з ВВ характеризується прийнятними ймовірностями хибної тривоги. Необхідно відзначити, що помилкові відповіді даного методу приводять до ситуації беззапитувального варіанта системи ВРЛ і не впливають на ймовірність одержання сигналів відповіді. Наведені залежності вказують на істотну залежність імовірності хибної тривоги від n (при збільшенні n від 2 до 3 імовірність хибної тривоги знижується на порядок) і m (при збільшенні m від 3 до 7 знижується з 0,18 до 0,13 при $\lambda_1=20000$).

Оцінимо завадостійкість запитувальних систем ВРЛ із відстроченою відповіддю при дії потоків сигналів запиту і навмисних корельованих завад. Для цього розглянемо вплив потоку сигналів запиту на ймовірність визначення координат цілей системою вторинної радіолокації.

Апаратура обробки прийнятих СВ запитувача реалізує алгоритм виявлення пачки СВ, що приймаються, який полягає у виявленні "к з m" сигналів відповіді. Якщо позначити ймовірність відповіді ЛВ як P_0 і розглядати її постійною для всієї пачки сигналів відповіді, то ймовірність першого виявлення пачки сигналів апаратурою запитувача можна визначити з такого співвідношення

$$P_{об} = \sum_{i=k}^m C_k^m P_0^i (1 - P_0)^{m-i} \quad (6)$$

Виходячи з того, що за час сканування антени запитувача відбувається опромінення відповідача пачкою з N СЗ, то ймовірність виявлення повітряного об'єкта системою ВРЛ з ВВ може бути визначена з такого співвідношення

$$P_c = \sum_{j=m}^N C_m^N P_{об}^j (1 - P_{об})^{N-j} \quad (7)$$

Підставляючи (6) у (7) остаточно одержуємо вираз для оцінки ймовірності опізнавання виявлених цілей у такому вигляді

$$P_c = \sum_{j=m}^N C_m^N \left[\sum_{i=k}^m C_k^m P_0^i (1 - P_0)^{m-i} \right]^j \times \left[1 - \sum_{i=k}^m C_k^m P_0^i (1 - P_0)^{m-i} \right]^{N-j} \quad (8)$$

Розрахунки за виразом (8) з урахуванням вищевикладеного наведені на рис. 5. Як бачимо, завадостійкість запропонованого методу реалізації систем ВРЛ з ВВ на базі СМ значно перевершує завадостійкість існуючих запитувальних способів реалізації систем ВРЛ [1], що вказує на його високу ефективність.

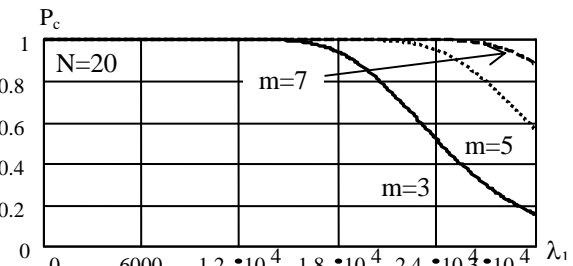


Рис. 5. Залежність $P_c = f(\lambda_1)$

Таким чином, наведені дослідження завадостійкості систем ВРЛ із ВВ показали його значну перевагу перед існуючими системами ВРЛ.

Вияновки

Запропоновані методи дозволяють значно підвищити завадостійкість систем ВРЛ за рахунок:

- переходу від обслуговування першого СЗ до обслуговування абонента чи мережі загалом;
- виключення можливості використання однопозиційного обчислення дальності до повітряного об'єкта протилежною стороною, за рахунок виключення можливості несанкціонованого використання літакових відповідачів.

Список літератури

1. Теоретичні основи побудови завадозахищених систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев та інші. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.
2. Пат. 17731 Україна / Спосіб радіолокаційного розпізнавання об'єктів / І.І. Обод, П.В. Овсянніков, А.М. Булай. – Чинний від 16.10.06.
3. Бакуменко Б.В., Булай А.М., Обод І.І. Єдине координатно-часове забезпечення як основа розв'язання протиріч спільного функціонування систем первинної і вторинної радіолокації // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2006. – №5 (54). – С. 3-9.

Надійшла до редколегії 9.10.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.І. Обод, Національний технічний університет „ХПІ”, Харків.