

СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ ВИЯВЛЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ЗАПИТУ У ЛІТАКОВИХ ВІДПОВІДАЧАХ СИСТЕМ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ОПІЗНАВАННЯ

Б.В. Бакуменко, А.М. Булай, І.І. Обод
(Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба)

Приводиться синтез оптимальних виявлювачів і порівняльний аналіз якості виявлення сигналів запиту у літакових відповідачах систем радіолокаційного опізнання.

системи радіолокаційного опізнання, виявлення сигналів запиту, показники якості виявлення, літаковий відповідач

Постановка проблеми та аналіз літератури. Рішення завдань, що стоять перед Повітряними Силами (ПС) багато в чому визначається інформаційним забезпеченням. Основою інформаційного забезпечення є системи первинної радіолокації, тобто системи, що працюють із ехосигналами. Такими, що забезпечують, а у ПС й основними, є запитувальні радіотехнічні системи, тобто системи працюючі по сигналах відповіді. До запитувальних радіотехнічних систем відносяться й системи радіолокаційного опізнання (РЛО) державної приналежності. Система РЛО повинна вирішувати завдання опізнання як в інтересах визначення ступеня небезпеки виявленої цілі, так і перед безпосереднім застосуванні зброї. Основним елементом, що істотно знижує завадостійкість системи РЛО, є літаковий відповідач (ЛВ) [1, 2]. Саме принципи побудови та принцип обслуговування сигналів запиту останнього й знижує завадостійкість, як літакових відповідачів, так і системи РЛО в цілому. Наявність багатоканальності в прийомі сигналів запиту розширює структурні можливості при побудові виявлювачів сигналів запиту, зокрема, у варіантах об'єднання попередніх рішень каналів. Однак в існуючих літакових відповідачах реалізований квазіоптимальний виявлювач при багатоканальному прийомі з об'єднанням каналних рішень виявлення сигналів запиту. Проведемо синтез й аналіз оптимальних виявлювачів сигналів запиту в ЛВ у різних постановках.

Мета статті. Синтез оптимальних виявлювачів і порівняльний аналіз показників якості виявлення сигналів запиту у літакових відповідачах при різних варіантах об'єднання попередніх рішень виявлення.

Основний розділ. Виявлювач сигналів запиту в ЛВ є багатоканальним. Це обумовлено наявністю декількох антенних систем, що працюють як на прийом сигналів запиту, так і на випромінювання сигналів відповіді [3]. Після порогових пристроїв (ПП) і дешифраторів (квазіоптимальний виявлювач сигналів запиту із цілою логікою обробки) сигнали підсумовуються елементом об'єднання. Однак варто враховувати, що параметри прийнятих сигналів запиту, прийняті різними каналами істотно відрізняються, що не враховується при побудові виявлювача сигналів в існуючих ЛВ. Крім того, в існуючих ЛВ об'єднанню підлягають попередні рішення про виявлення сигналів запиту, здійснені, як правило, дешифратором, тобто квазіоптимальним виявлювачем. Однак, сигнали запиту, як відомо [2], містять декілька простих сигналів без внутрішньоімпульсної модуляції, часове розміщення яких і визначає код сигналу запиту. Ці обставини дозволяють синтезувати оптимальний виявлювач сигналів запиту у двох різних постановках:

- виявлення сигналів запиту з ваговим міжканальним об'єднанням каналних рішень про виявлення сигналів запиту;

- виявлення сигналів запиту з ваговим міжканальним об'єднанням каналних імпульсів сигналів запиту.

Проведемо синтез виявлювачів сигналів запиту в розглянутих постановках і проведемо порівняльний аналіз показників якості виявлення. Будемо вважати, що число каналів прийому сигналів запиту дорівнює m , а число імпульсів у сигналі запиту становить n (значність коду). Одержимо загальний алгоритм виявлення сукупності одиничних рішень y , на підставі отриманого алгоритму, розглянемо структури виявлювачів сигналів запиту у ЛВ при визначених вище постановках.

У кожному з каналів обробки ЛВ прийняті сигнали після оптимальної лінійної обробки й детектування зрівнюються в ПП з порогом. Після ПП на подальшу обробку надходить реалізація $x_{ij} = 1$, якщо в елементі часового дозволу ($i = \overline{1, m}$) й ($j = \overline{1, n}$), що відповідає аналізованому просторовому дозволу, відбулося перевищення порога; якщо ж не відбулося – тоді $x_{ij} = 0$. Для ухвалення рішення про наявність або відсутність імпульсу при спільній міжканальній обробці піддається сукупність нулів й одиниць x_{ij} . Очевидно, що x_{ij} – випадкова величина, що підпорядковується розподілу Бернуллі

$$P(x_{ij}) = P_{ij}^{x_{ij}} (1 - P_{ij})^{1 - x_{ij}}, \quad (1)$$

де P_{ij} – імовірність перевищення порога в ij -м каналі обробки. Під час

відсутності сигналу $P_{ij} = F_{ij}$ – імовірність хибної тривоги, а при впливі сигналу $P_{ij} = D_{ij}$ – імовірність виявлення.

Задачу оптимальної обробки сигналів можна розглядати в різних постановках. Дійсно, в виявлювачі, що розглядається, можливе керування напругою порога спрацьовування вихідного ПП, а також напругою порога каналних порогових пристроїв. Розглянемо характеристики виявлювача при керуванні величиною порога тільки на вихідному ПП. Імовірності хибної тривоги й правильного виявлення імпульсів у каналах обробки будемо вважати заданими (хоча й довільними).

Припустимо, що на вхід пристрою спільної обробки прийнятих сигналів надходить сукупність випадкових величин x_{ij} . Спільні розподіли ймовірностей всіх можливих комбінацій x_{ij} як під час відсутності, так і при наявності сигналу (гіпотези H_0 та H_1), тобто $P(x_{ij}|H_0)$ та $P(x_{ij}|H_1)$ довільні, але відомі. Для кожної конкретної сукупності x_{ij} сформуємо відношення правдоподібності

$$\Lambda = P(x_{ij}|H_1)/P(x_{ij}|H_0). \quad (2)$$

Порівняння Λ з порогом, заданим по припустимій імовірності хибної тривоги, забезпечує оптимальне за критерієм Неймана-Пірсона рішення про наявність або відсутність сигналу.

Через незалежність шумів у каналах обробки можна записати

$$P(x_{11}, \dots, x_{mn}|H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{m, n} P(x_{ij}|H_0) = \prod_{i=1, j=1}^{m, n} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (3)$$

Легко побачити, що при впливі сигналу перевищення порогів у каналах обробки – незалежні події. Тоді можна записати

$$P(x_{11}, \dots, x_{mn}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{m, n} P(x_{ij}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{m, n} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (4)$$

З урахуванням (3) і (4) вираз (2) можна записати як

$$\Lambda = \prod_{i=1, j=1}^{m, n} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}} / \prod_{i=1, j=1}^{m, n} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (5)$$

Прологарифмувавши (5) одержуємо

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1, j=1}^{m, n} x_{ij} (\ln D_{ij} - \ln F_{ij}) + (1 - x_{ij}) [\ln(1 - D_{ij}) - \ln(1 - F_{ij})]. \quad (6)$$

Якщо позначити множники при x_{ij}

$$Q_{ij} = \ln D_{ij} - \ln F_{ij} - \ln(1 - D_{ij}) + \ln(1 - F_{ij}) = \ln \left(\frac{D_{ij}(1 - F_{ij})}{(1 - D_{ij})F_{ij}} \right) \quad (7)$$

і відкинути що складають, що не залежать від x_{ij} , одержуємо оптимальний за критерієм Неймана-Пірсона алгоритм виявлення сигналів запиту при об'єднанні попередніх рішень виявлення сигналів або імпульсів всіх каналів обробки ЛВ

$$L = \sum_{i=1, j=1}^{m, n} Q_{ij} x_{ij} \geq z_0, \quad (8)$$

де z_0 – поріг, обумовлений вихідною ймовірністю F .

Отже, оптимальна спільна обробка сигналів запиту зводиться до вагового підсумовування одиниць і нулів x_{ij} , що відбивають прийняті в каналі обробки попередні рішення. Вагові коефіцієнти (7) підвищують роль того каналу, де вище ймовірність D_{oij} і нижче ймовірність F_{oij} . Вагові коефіцієнти (7) залежать як від відношення сигнал/шум, так і від рівня шумів у різних каналах обробки ЛВ.

Оскільки x_{ij} рівні 0 або 1, де ліва частина (8) являє собою суму $k < mn$ вагових коефіцієнтів Q_{ij} , то виходить, може приймати лише певні дискретні значення. Значення порога z_0 в цьому випадку може ле-

жати в межах $0 < z_0 < \sum_{i=1, j=1}^{m, n} Q_{ij}$, щоб, з одного боку, не приймалося зав-

жди тривіальне рішення про виявлення, а з іншого боку – тривіальне рішення про невиявлення. Якщо всі Q_{ij} різні й сума будь-якої групи Q_{ij} не збігається із сумою будь-якої іншої їхньої групи, то при різних комбінаціях значень x_{ij} для розглянутого нами випадку можливі $2^m - 1$ різні правила виявлення.

Слід зазначити, що підсумовування імпульсів сигналу запиту в каналах обробки здійснюється без ваг, через однакові відношення сигнал/шум і рівня завад у каналі, що трохи спрощує алгоритм обробки. Зокрема, виявлювач сигналів у каналах для першої ситуації або кінцевий виявлювач сигналів для другої ситуації може бути виконаний у вигляді дешифратора із цілою логікою обробки («п з п»). Безвагове сумування нулів й одиниць у каналах обробки й заміна виявлювача сигналів запиту дешифратором не приводить до істотних втрат у пороговому відношенні сигнал/шум.

У цьому випадку для розглянутих нами ситуацій вираз (8) можна записати таким чином:

при міжканальному об'єднанні результатів виявлення сигналів запиту

$$L = \sum_{i=1}^m Q_i \times \left(x_i = \prod_{j=1}^n x_j \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_0, \quad (9)$$

при міжканальному об'єднанні результатів виявлення імпульсів сигналів запиту

$$L = \prod_{j=1}^n \left(x_j = \sum_{i=1}^m Q_i x_i \right) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_0. \quad (10)$$

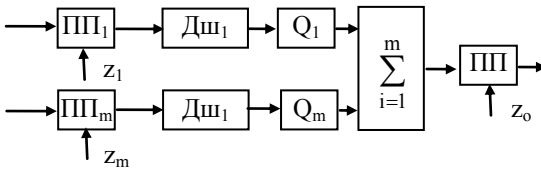


Рис. 1. Структура виявлювача з об'єднанням каналних рішень про виявлення сигналів

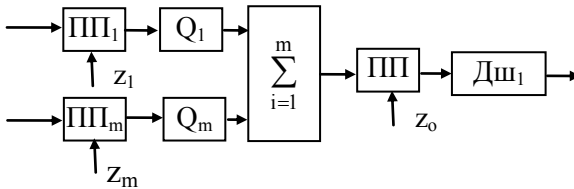


Рис. 2. Структура виявлювача з об'єднанням каналних рішень про виявлення імпульсів

Отримані алгоритми (9) і (10) дозволяють викласти структурні схеми виявлювачів сигналів запиту, для розглянутих ситуацій міжканального об'єднання попередніх каналних рішень про виявлення сигналів або імпульсів, у вигляді, наведеному на рис. 1 і 2 відповідно. Як видно із представлених рисунків, у синтезованих виявлювачах є три

порогових пристроїв: по-перше – пороговий пристрій з аналоговим порогом, де відбувається виявлення імпульсів запитувального сигналу, по-друге – у дешифраторах (цифровий поріг) і по-третє – при виявленні об'єднаних імпульсів (сигналів) (цифровий поріг).

При фіксованих ймовірностях попередніх рішень у каналах обробки, як при виявленні сигналів запиту, так і при виявленні імпульсів сигналу запиту F_i і D_i , різні вирішальні правила дають різні значення ймовірностей F й D . Щоб вибрати оптимальне правило міжканального об'єднання попередніх рішень виявлення сигналу або імпульсу, тобто поріг z_0 в (8), (9) і (10), одержимо вираз для ймовірностей хибної триво-

ги F і виявлення D . Тому що x_i підпорядковується розподілу Бернуллі (1) із щільністю $W(x_i) = P_i \delta(x_i - 1) + (1 - P_i) \delta(x_i)$, тоді для випадкової величини $z_i = Q_i x_i$ одержимо щільність імовірності й характеристичну функцію у вигляді

$$W(z_i) = P_i \delta(z_i - Q_i) + (1 - P_i) \delta(z_i), \quad \Theta(u) = P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i).$$

Характеристична функція L - суми незалежних величин (8)

$$\Theta_L(u) = \prod_{i=1}^m \Theta_i(u) = \prod_{i=1}^m [P_i \exp(juQ_i) + (1 - P_i)]. \quad (11)$$

Зворотне перетворення Фур'є дає щільність імовірності L при огляді по m

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \delta(z) + \sum_{k=1}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \delta(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r}) \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (12)$$

При зміні k від 1 до m кратність суми в (12), у загальному випадку, також змінюється від 1 до m . Якщо розглядати випадок числа каналів обробки $m=2$, то одержуємо

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^2 (1 - P_i) \delta(z) + \sum_{i_1=1}^2 P_{i_1} \delta(z - Q_{i_1}) \prod_{j=1}^2 (1 - P_j) + P_{i_1} P_{i_2} \delta[z - (Q_{i_1} + Q_{i_2})]. \quad (13)$$

Для одержання ймовірності хибної тривоги або правильного виявлення, підставимо в (13) F_i або D_i , і проінтегруємо отриманий вираз в межах від z_0 до ∞ . Крім того, тому що $z_0 > 0$, то перший член виразу (13) не дає внеску в інтеграл, що обчислюється. Те ж відноситься до всіх членів, у яких в аргументі δ -функції $\sum_{r=1}^k Q_{i_r} < z_0$. Якщо більше найбли-

жче z_0 значення суми вагових коефіцієнтів містить n доданків і дорівнює $\sum_{r=1}^k Q_{i_r}$, то ймовірність перевищення порога z_0 можна записати у вигляді

$$P = \sum_{k=n}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1}^m (1 - P_j). \quad (14)$$

Наприклад, для розглянутого нами вище випадку $m = 2$, вираз (14) можна записати, як $P = P_2(1 - P_1) + P_1 P_2$. З виразу (14) при заданих значеннях F_i, D_i можна обчислити вихідні ймовірності F й D для будь-якого значення порога z_0 й відповідного йому вирішального правила. Чим більше z_0 (тобто чим жорсткіше вирішальне правило), тим менше F й D .

Таким чином, оптимізація виявлення сигналів запиту в ЛВ зводиться до вибору для спільної обробки одного з вирішальних правил, що задовольняють алгоритму (8), (9) і (10) і при установці однакових відносних порогів у каналах обробки сигналів запиту ЛВ, що забезпечують такі значення F_i , які при обраному вирішальному правилі дають необхідне значення результуючої ймовірності F .

Розрахунок показників якості виявлення сигналів запиту по наведеним вище виразам досить складний через необхідність розгляду розходження заводових коливань і відношення сигнал/шум у каналах обробки. Припустимо, що число каналів обробки дорівнює m . У кожному каналі обробки однакове відношення сигнал/шум. У цих умовах вагові коефіцієнти внутріканального й міжканального об'єднання однакові, а розрахункові вираження для показників якості виявлення можна записати як:

– для виявлювача, що представлений на рис. 1,

$$P = \sum_{i=k}^m (P_1^n)^i (1 - P_1^n)^{m-i}; \quad (15)$$

– для виявлювача, що представлений на рис. 2,

$$P = \left(\sum_{i=k}^m P_1^i (1 - P_1)^{m-i} \right)^n, \quad (16)$$

де k – цифровий поріг ухвалення рішення; P_1 – імовірність виявлення одичного імпульсу. По наведених виразах при заданих F_0 і D_0 можна обчислити вихідні ймовірності для будь-якого значення цифрового порога.

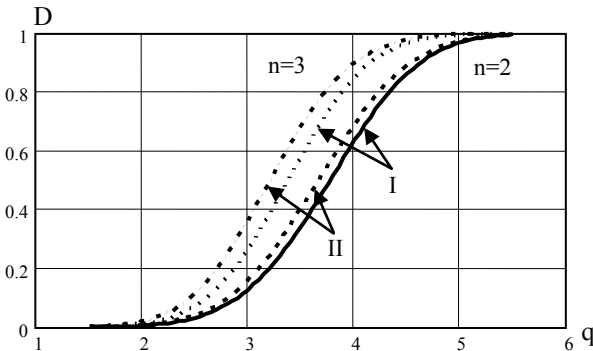


Рис. 3. Показники якості виявлення сигналів запиту

Розрахунки якості виявлення сигналів запиту в ЛВ для $m = 2$ представлені на рис. 3. Розрахунки проведені для значності сигналу запиту $n = 3$, що характерно для систем радіолокаційного опізнання країн СНД, і $n = 2$, що харак-

терно для систем радіолокаційного опізнання країн НАТО. Наведені розрахунки показали, що якість виявлення для виявлювача з міжканаль-

ним об'єднанням рішень про виявлення сигналів запиту (І) має незначний програш у пороговому відношенні сигнал/шум у порівнянні з якістю виявлення для виявлювача з міжканальним об'єднанням рішень про виявлення імпульсів сигналу запиту.

Виводи. Отримані результати дозволяють зробити наступні виводи:

– міжканальне вагове об'єднання результатів виявлення імпульсів сигналу запиту значно розширяє кількість цифрових порогів прийняття рішень виявлення сигналів запиту;

– міжканальне об'єднання результатів виявлення імпульсів дозволяє одержати переваги в пороговому відношенні сигнал/шум (близько 1 дБ) у порівнянні з міжканальним об'єднанням результатів виявлення сигналів запиту;

– збільшення значності використовуємих сигналів запиту систем радіолокаційного опізнавання дозволяє підвищити ймовірність виявлення їх у літакових відповідачах.

При подальших дослідженнях становить інтерес дослідження структури виявлювачів сигналів запиту в ЛВ із міжканальним ваговим об'єднанням і широкою постановкою виявлення, тобто при різних порогах виявлення імпульсів у каналах обробки. При цьому важливо з'ясувати можливість одночасної оптимізації, як спільної обробки, так і самих попередніх рішень у кожному каналі обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с.*
2. *Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦИИТ, 1998. – 118 с.*
3. *Давыдов П.С., Жаворонков В.П., Кащеев Г.В. Радиолокационные системы летательных аппаратов. – М.: Транспорт, 1977. – 356 с.*

Надійшла 28.03.2006

Рецензент: доктор технічних наук, доцент Г.В. Єрмаков,
Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба.