

Літальні апарати: аеродинаміка, силові установки, обладнання та озброєння

УДК 004.045:621.396.967.2

І.І. Обод, О.О.Стрельницький, В.А.Андрусевич

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ ОПТИМАЛЬНИХ ВИЯВЛЮВАЧІВ СИГНАЛІВ ЗАПИТУ В ЛІТАКОВИХ ВІДПОВІДАЧАХ ЗАПИТАЛЬНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Робота присвячена синтезу та аналізу виявлювачів сигналів запиту у літакових відповідачах запитальних систем спостереження повітряного простору. Показано, що реалізація спільної обробки сигналів запиту всіх просторово розділених каналів самолетного відповідача приводить до підвищення показателів якості виявлення сигналів запиту.

Ключові слова: сигнали запиту, літакові відповідачі, системи спостереження повітряного простору.

Вступ

Постановка проблеми й аналіз літератури. Рішення задач, що стоять перед Повітряними Силами в чому визначається інформаційним забезпеченням. Основою інформаційного забезпечення є первинні системи спостереження (СС), тобто системи, що працюють з ехо-сигналами, та вторинні СС, тобто системи працюють за сигналами відповіді (СВ). Основним елементом, який істотно знижує завадостійкість запитальних СС, є літаковий відповідач (ЛВ) [1-3]. Саме принцип побудови останнього, принцип обслуговування сигналів запиту (СЗ) знижує завадостійкість, як ЛВ, так і запитальних СС в цілому. Наявність багатоканальності в прийомі СЗ розширює структурні можливості при побудові виявлювачів СЗ, зокрема, в варіантах об'єднання попередніх рішень каналів виявлення. Однак в існуючих ЛВ реалізований квазіоптимальний виявлювач СЗ при багатоканальному прийомі з об'єднанням каналних рішень виявлення СЗ.

Мета роботи. Синтез оптимальних виявлювачів та аналіз показників якості виявлення СЗ в ЛВ при різних варіантах об'єднання попередніх рішень виявлення.

Основна частина

Виявлювач СЗ в ЛВ є багатоканальним. Це обумовлено наявністю декількох антенних систем, що працюють як на прийом СЗ, так і випромінювання СВ [4]. Після порогових пристроїв і дешифраторів сигнали підсумовуються елементом об'єднання. Однак слід враховувати, що параметри прийнятих СЗ, прийняті різними каналами істотно відрізняються, що не враховується при побудові виявлювачів

сигналів в існуючих ЛВ. Крім того, в існуючих ЛВ об'єднанню підлягає попередні рішення про виявлення СЗ, здійснені, як правило, дешифратором, тобто квазіоптимальним виявлювачем. Однак, СЗ, як відомо [2], містять кілька простих сигналів без внутрішньімпульсної модуляції, часова розстановка яких і визначає код СЗ. Ці обставини дозволяють синтезувати оптимальний виявлювач СЗ в двох різних постановках:

- виявлення СЗ з ваговим міжканальним об'єднанням каналних рішень про виявлення СЗ;
- виявлення СЗ з ваговим міжканальним об'єднанням каналних імпульсів СЗ.

Будемо вважати, що число каналів прийому СЗ дорівнює m , а число імпульсів в СЗ становить n (значність коду). Отримаємо загальний алгоритм виявлення сукупності одиничних рішень i , на підставі отриманого алгоритму, розглянемо структури виявлювачів СЗ в ЛВ при зазначених вище постановках.

У кожному з каналів обробки ЛВ прийняті сигнали після оптимальної лінійної обробки і детектування порівнюються в ПП з порогом.

Після ПП на подальшу обробку надходить реалізація $x_{ij} = 1$, якщо в елементі часового дозволу ($i = \overline{1, m}$) і ($j = \overline{1, n}$), відповідному аналізуемому просторовому дозволу, відбулося перевищення порога; якщо ж не сталося – то $x_{ij} = 0$.

Для прийняття рішення про наявність або відсутність сигналу при спільній міжканальній обробці піддається сукупність нулів і одиниць x_{ij} . Очевидно, що x_{ij} - випадкова величина, що підкоряється розподілу Бернуллі

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

де P_{ij} - ймовірність перевищення порога в ij -му каналі обробки.

У відсутності сигналу $P_{ij} = F_{ij}$ - ймовірність хибної тривоги, а при впливі сигналу $P_{ij} = D_{ij}$ - ймовірність виявлення.

Задачу оптимальної обробки сигналів можна розглядати в різних постановках. Дійсно в розглянутому виявлювачі можливе управління напругою порога спрацьовування вихідного ПП, а також напругою порога каналних ПП. Розглянемо характеристики виявлювача при управлінні величиною порога тільки на вихідному ПП. Ймовірності хибної тривоги і правильного виявлення сигналів в каналах обробки будемо вважати заданими (хоча і довільними).

Припустимо, що на вхід пристрою спільної обробки прийнятих сигналів надходить сукупність випадкових величин x_{ij} . Спільні розподілу ймовірностей всіх можливих комбінацій x_{ij} як у відсутність, так і при наявності сигналу (гіпотези H_0 та H_1), тобто

$$P(x_{ij}|H_0) \text{ и } P(x_{ij}|H_1)$$

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, визначеним за допустимої ймовірності помилкової тривоги, забезпечує оптимальне за критерієм Неймана-Пірсона рішення про наявність або відсутність сигналу.

Через незалежності шумів в каналах обробки можна записати

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

Легко бачити, що при впливі сигналу перевищення порогів в каналах обробки - незалежні події. Тоді можна записати

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

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

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

Прологарифмував (5) отримуємо

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

Якщо позначити множники при x_{ij}

$$\begin{aligned} Q_{ij} = \\ = \ln D_{ij} - \ln F_{ij} - \ln(1 - D_{ij}) + \ln(1 - F_{ij}) = \\ = D_{ij}(1 - F_{ij}) / (1 - D_{ij})F_{ij}. \end{aligned} \quad (7)$$

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

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

де z_0 - поріг, який визначається вихідний ймовірністю F .

Отже, оптимальна спільна обробка СЗ зводиться до вагового підсумовуванню одиниць і нулів x_{ij} , що відображають прийняті в каналі обробки попередні рішення. Вагові коефіцієнти (7) підвищують роль того каналу, де вища ймовірність D_{oij} і нижча ймовірність F_{oij} . Вагові коефіцієнти (7) залежать як від відношення с/ш, так і від рівня шумів в різних каналах обробки ЛВ.

Поскольку x_{ij} равны 0 или 1, то левая часть (8) представляет собой сумму $k < mn$ весовых коэффициентов Q_{ij} , а значит, может принимать лишь определенные дискретные значения. Значение порога z_0 в этом случае может лежать в пределах

$$0 < z_0 < \sum_{i=1, j=1}^{m, n} Q_{ij},$$

чтобы, с одной стороны, не принималось всегда тривиальное решение об обнаружении, а с другой - тривиальное решение о необнаружении. Если все Q_{ij} различны и сумма любой группы Q_{ij} не совпадает с суммой любой другой их группы, то при различных комбинациях значений x_{ij} для рассматриваемого нами случая возможны $2^m - 1$ различных правила обнаружения.

Слід зазначити, що підсумовування імпульсів сигналу запиту в каналах обробки здійснюється без ваг, через однакових відносин с/ш і рівня завад в

каналі, що дещо спрощує алгоритм обробки. Зокрема, виявлювач сигналів в каналах для першої ситуації або крайовий виявлювач сигналів для другої ситуації може бути виконаний у вигляді дешифратора з цілої логікою обробки («п з п»). Безвесове підсумовування нулів та одиниць в каналах обробки і заміна виявлювача СЗ дешифратором не приводить до істотних втрат в пороговому відношенні $c / ш$.

В цьому випадку, для розглянутих нами ситуацій, вираз (8) можна записати:

при міжканальному об'єднанні результатів виявлення СЗ

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

при міжканальному об'єднанні результатів виявлення імпульсів СЗ

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

Отримані алгоритми (9) і (10) дозволяють виокласти структурні схеми виявлювачів СЗ, для розглянутих ситуацій між каналного об'єднання попередніх каналних рішень про виявлення сигналів або імпульсів. В синтезованих виявлювачах мається три порогових пристрої: перший - ПП з аналоговим порогом, де відбувається виявлення імпульсів СЗ, другий - в дешифраторі (цифровий поріг) і третій - при виявленні об'єднаних імпульсів (сигналів) (цифровий поріг).

При фіксованих імовірностях попередніх рішень в каналах обробки, як при виявленні СЗ, так і при виявленні імпульсів СЗ F_i та D_i , різні вирішальні правила дають різні значення ймовірностей F і D . Щоб вибрати оптимальне правило міжканального об'єднання попередніх рішень виявлення сигналу або імпульсу, тобто поріг z_0 в (8), (9) і (10), отримаємо вираз для ймовірностей хибної тривоги F і виявлення D . Так як x_i підкоряються розподілу Бернуллі (1) з щільністю

$$W(x_i) = P_i \delta(x_i - 1) + (1 - P_i) \delta(x_i),$$

то для випадкової величини $z_i = Q_i x_i$ отримаємо щільність ймовірності та характеристичну функцію у вигляді

$$W(z_i) = P_i \delta(z_i - Q_i) + (1 - P_i) \delta(z_i),$$

$$\Theta(u) = P_i e^{juQ_i} + (1 - P_i)$$

Характеристична функція L - суми незалежних

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

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

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \delta(z) + \sum_{k=1}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m A_{i_k}, \quad (12)$$

$$A_{i_k} = P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \times$$

де

$$\times \delta \left(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r} \right) \prod_{j=1}^m (1 - P_j).$$

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

$$W_L(u) = \prod_{i=1}^2 (1 - P_j) \delta(z) + \sum_{i_1=1}^2 P_j \delta(zQ_{i_1}) \times$$

$$\times \prod_{j=1}^2 (1 - P_j) + P_{i_1} P_{i_2} \delta(z - (Q_{i_1} + Q_{i_2})). \quad (13)$$

Для отримання 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, так як $z_0 > 0$, то перший член виразу (13) не дає вкладу в який вираховується інтеграл. Те ж відноситься до всіх членів, у яких в аргументі δ - функції

$$\sum_{r=1}^k Q_{i_r} < z_0.$$

Якщо більшу найближче 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

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

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

Розрахунок показників якості виявлення СЗ за наведеними вище виразами досить складний через

необхідність розгляду відмінності завадових коливань і відносини с/ш в каналах обробки. Припустимо, що число каналів обробки одно m , У кожному каналі обробки однакове ставлення с/ш.

В цих умовах вагові коефіцієнти внутриканального і міжканального об'єднання однакові, а розрахункові вирази для показників якості виявлення можна записати як:

- для виявлювача відповідно до (9)

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

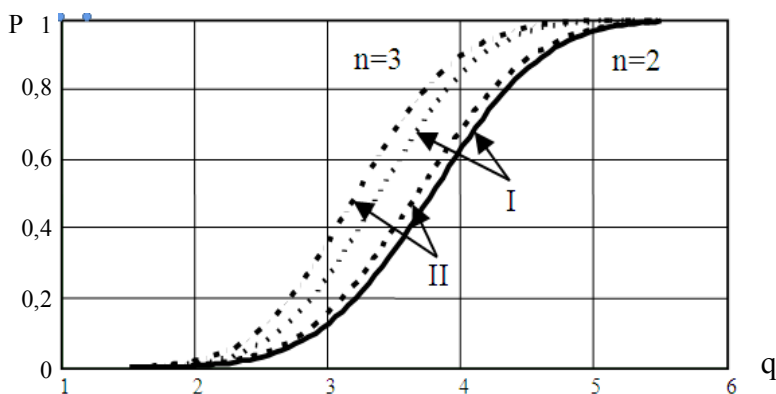


Рис. 1. Показники якості виявлення сигналів запиту

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- міжканальне об'єднання результатів виявлення імпульсів дозволяє отримати переваги в пороговому відношенні с/ш (близько 1 дБ) порівняно з міжканальним об'єднанням результатів виявлення сигналів запиту;

- збільшення значності використовуваних сигналів запиту запитальних СС дозволяє підвищити ймовірність виявлення їх в ЛВ.

Список літератури

1. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборо-

- для виявлювача відповідно до (10)

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

де k – цифровий поріг прийняття рішення; P_1 – ймовірність виявлення одиночного імпульсу. За наведеними виразами при заданих F_0 і D_0 можна обчислити вихідні ймовірності для будь-якого значення цифрового порога.

Розрахунки якості виявлення СЗ в ЛВ для $m = 2$ представлені на рис. 1.

ни / [Ткачев В.В., Даник Ю.Г., Жуков С.А. і др.]. – К.: МОУ, 2004. – 342 с.

2. Теоретичні основи побудови завадозахищених 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.

3. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации / И.И. Обод. – М.: ЦИИТ, 1998. – 118 с.

4. Давыдов П.С. Радиолокационные системы летательных аппаратов / П.С. Давыдов, В.П. Жаворонков, Г.В. Кащеев. – М.: Транспорт, 1977. – 356 с.

Надійшла 23.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук професор Г.В.Єрмаков, Національний технічний університет «ХПІ», Харків

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ ЗАПРОСА В САМОЛЕТНЫХ ОТВЕТЧИКАХ ЗАПРОСНЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

И.И. Обод, А.А. Стрельницкий, В.А. Андрусевич

Работа посвящена синтезу и анализу обнаружителей сигналов запроса в самолетных ответчиках запросных систем наблюдения воздушного пространства. Показано, что реализация совместной обработки сигналов запроса всех пространственно разделенных каналов самолетного ответчика приводит к повышению показателей качества обнаружения сигналов запроса.

Ключевые слова: сигналы запроса, самолетные ответчики, системы наблюдения воздушного пространства.

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF OPTIMAL DETECTOR REQUEST SIGNALS IN AIRPLANE DEFENDANT INTERROGATION SURVEILLANCE SYSTEMS AIRSPACE

I.I. Obad, A.A. Strelnickiy, V.A. Andrysevich

The paper is devoted to the synthesis and analysis of detectors request signals in aircraft transponders interrogations surveillance of airspace. It is shown that the implementation of the joint request of all the signal processing of spatially separated channels aircraft defendant leads to higher quality indicators signal detection request.

Keywords: request signals, aircraft transponders airspace surveillance system.