

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ В ЗАПИТАЛЬНИХ СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

### Вступ

Основою інформаційного забезпечення споживачів системи контролю використання повітряного 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 внутріімпульсної 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 аналізуємому 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. В відсутність 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  $P(x_{ij}|H_0)$  і  $P(x_{ij}|H_1)$  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  $\Lambda$  з порогом, визначеним за допустимої ймовірності хибної 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

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

Якщо позначити множники при  $x_{ij}$

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

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

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

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.

Оскільки  $x_{ij}$  дорівнює 0 чи 1, то ліва частина (8) представляє собою суму  $k < mn$  вагових коефіцієнтів  $Q_{ij}$ , а значить, може приймати тільки певні дискретні значення. Значення порогу  $z_0$  в цьому випадку може лежати в межах  $0 < z_0 < \sum_{i=1, j=1}^{m, n} Q_{ij}$ , щоб, з одного боку, не приймалися завжди тривіальне рішення про виявлення, а з іншого – тривіальне рішення про невиявлення.

Якщо все  $Q_{ij}$  різні і сума будь-якої групи  $Q_{ij}$  не збігається з сумою будь-який інший їх групи, то при різних комбінаціях значень  $x_{ij}$  для розглядаємого нами випадку можливі  $2^m - 1$  різних правил виявлення.

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 («n з n»). Безвесове підсумовування нулів та одиниць в каналах обробки і заміна виявлювача СЗ дешифратором не приводить до істотних втрат в пороговому відношенні с / ш.

В цьому випадку, для розглянутих нами ситуацій, вираз (8) можна записати: при міжканальному об'єднанні результатів виявлення СЗ

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

при міжканальному об'єднанні результатів виявлення імпульсів СЗ

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

Отримані алгоритми (9) і (10) дозволяють викласти структурні схеми виявлювачів СЗ, для розглянутих ситуацій між канального 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  $W(x_i) = P_1 \delta(x_i - 1) + (1 - P_1) \delta(x_i)$ , то для випадкової величини  $z_i = Q_i x_i$  отримаємо щільність ймовірності та характеристичну функцію у вигляді

$$W(z_i) = P_1 \delta(z_i - Q_i) + (1 - P_1) \delta(z_i),$$

$$\Theta(u) = P_1 e^{juQ_i} + (1 - P_1)$$

Характеристична функція L-суми незалежних

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

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

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

$$\text{де } A_{i_k} = P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \delta(z - \sum_{r=1}^k Q_{i_r}) \prod_{j=1}^m (1 - P_j).$$

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

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

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  $\infty$ . 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  $\delta$ -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 однако-ве ставлення с/ш. В цих умовах вагові коефіцієнти внутріканального і міжканального об'єднання однакові, а розрахункові вирази для показників якості виявлення спрощуються.

Розрахунки якості виявлення СЗ в ЛВ для  $m = 2$  представлені на рис.1, для  $m = 3$  пред-ставлені на рис.2.

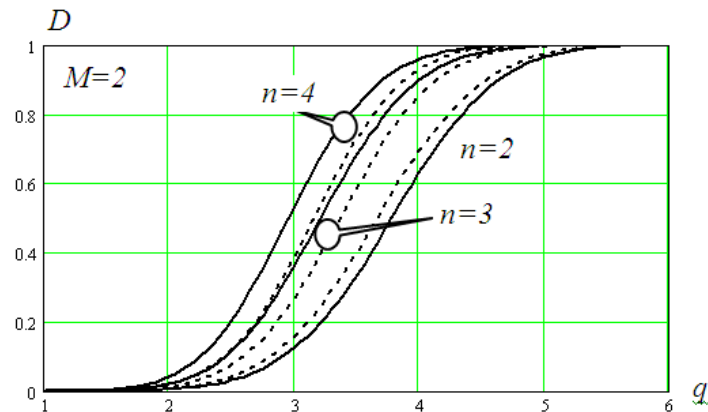


Рис.1. Показники якості виявлення СЗ

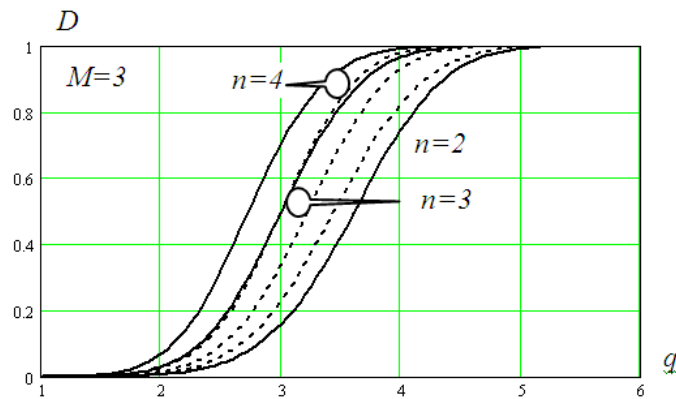


Рис.2. Показники якості виявлення СЗ

## 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 СЗ;
- збільшення значності використовуваних СЗ запитальних СС дозволяє підвищити ймовірність виявлення їх в ЛВ.

**Список літератури:** 1. Обод І.І., Свид І.В., Штих І.А. Завадозахищеність запитальних систем спостереження повітряного простору : монографія ; за заг. ред. І.І. Обода. – Харків : ХНУРЕ, 2014. – 312 с. 2. І Обод І.І., Свид І.В., Штих І.А. Завадозахищеність ідентифікаційних систем ближньої дії // Системи обробки інформації : зб. наук. праць. – Х. : Харк. ун-т Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. – Вип. 5 (121) – С. 77 – 79. 3. Пат. 79545 МПК (2013.01) Н04L 12/00. Спосіб передачі інформації / І.І. Обод, І.В. Свид, В.В. Шевцова ; Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. – № u201212327; заявл. 29.10.2012; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8 – 4 с. 4. Обод І.І. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М. : ЦИИТ. – 1998. – 118 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.09.2014