

І.В. СВИД, канд. техн. наук, Д.О. СУХОПУКОВ, О.В. КОРОТІЧ, Т.С. МАЧОНІС

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ СИГНАЛІВ ЗАПИТУ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Вступ

Запитальні інформаційні системи є важливою складовою інформаційного забезпечення управління повітряного руху і системи контролю повітряного простору. До запитальних інформаційних систем відносяться системи вторинної радіолокації [1 – 5], системи радіолокаційної ідентифікації державної приналежності [6 – 10] та радіосистеми ближньої навігації [11 – 14].

Слід зазначити, що основним елементом досліджуваної системи, який суттєво знижує якість інформаційного забезпечення, є літаковий відповідач (ЛВ) [15 – 17]. Ця обставина зумовлена принципом побудови літакового відповідача як відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами [18]. Така побудова зазначеної інформаційної радіолокаційної системи дозволяє зацікавленій стороні здійснювати несанкціоноване отримання польотної інформації від літакового відповідача, що розглядається, і, також, здійснювати паралізацію літакового відповідача постановкою навмисних корельованих завад необхідної інтенсивності. При цьому слід зазначити, що у існуючих літакових відповідачах запитальних інформаційних систем, зазвичай, реалізується квазіоптимальний виявлювач сигналів запиту при багатоканальному прийомі з об'єднанням каналних рішень виявлення сигналів запиту. Однак це призводить до енергетичних втрат при прийомі сигналів запиту і, як наслідок, зниження якості обслуговування сигналів запиту.

Метою запропонованої роботи є підвищення якості обслуговування сигналів запиту в запитальних інформаційних системах за рахунок управління потоками сигналів запиту.

Управління потоками сигналів запиту

Як видно з моделі літакового відповідача несинхронної запитальної інформаційної системи [19, 20], сигнали запиту, що надходять на його вхід, обслуговуються з відмовами. Ця обставина дозволяє стверджувати, що характеристики процесу обслуговування сигналів запиту в літаковому відповідачі істотно впливають на статистичні властивості потоку сигналу відповіді, що в підсумку, як наслідок, відображається на ефективності роботи всього радіолокаційного каналу передачі сигналів відповіді з активною відповіддю. При цьому слід зазначити, що однією з важливих характеристик процесу обслуговування сигналів запиту в літаковому відповідачі є його кореляційна функція $R(t)$, на основі аналізу якої можливо зробити висновок щодо вибору типу потоку сигналів відповіді та структури літакового відповідача. Ця обставина дозволяє, за інших рівних умов, досягти підвищення ймовірності обслуговування, збільшення ймовірності виявлення повітряного об'єкта, зменшення середньоквадратичної помилки оцінки азимуту повітряного об'єкта та підвищення достовірності передачі польотної інформації з борту повітряного об'єкту, що спостерігається.

При цьому слід зазначити, що процес обслуговування сигналів запиту літаковим відповідачем можливо представити у вигляді деякої часової функції $Q(t)$, яка приймає значення "одиниця", якщо літаковий відповідач вільний та "нуль" – у протилежному випадку.

Зазначену часову функцію $Q(t)$, яка слідує з моделі літакового відповідача [21], можливо отримати з потоку сигналів відповіді, коли провести розширення кожного сигналу відповіді вліво за віссю часу на ширину $T_i - t_{o(i-1)}$, при обслуговуванні сигналів відповіді, випромінюваних основним променем діаграми спрямованості антени запитувача, та $T_i - t_{p(i-1)}$ при обслуговуванні сигналів відповіді, випромінюваними за боковими пелюстками діаграми

спрямованості антени запитувача, де T_i – часовий інтервал між моментами появи $(i-1)$ та i -го сигналу відповіді, $t_{o(i-1)}$ – час обслуговування $(i-1)$ -го сигналу запиту, випромінюваного основним променем діаграми спрямованості антени запитувача, $t_{p(i-1)}$ – час паралізації літакового відповідача при прийманні сигналів відповіді, які випромінені боковими пелюстками діаграми спрямованості антени запитувача.

Зазначимо, так як потік сигналів відповіді визначається потоком сигналів запиту та коефіцієнтом готовності літакового відповідача, то можливо стверджувати, що управлінням потоком сигналів відповіді в мережі запитальних інформаційних систем можливо підвищити за рахунок підвищення імовірності обслуговування сигналів запиту літаковим відповідачем, а отже і всією запитальною інформаційною системою.

Таким чином, виходячи з викладеного – підвищення якості обслуговування сигналів запиту запитальних несинхронних інформаційних систем можливо досягнути за рахунок:

- управління потоком сигналів запиту в мережі вторинних радіолокаторів;
- зниження сумарної інтенсивності потоку сигналів запиту;
- зниження сумарної інтенсивності потоку сигналів відповіді.

При цьому слід зазначити, що відомі різні методи підвищення завадостійкості зазначених запитальних інформаційних систем [1 – 3]. Більшість з зазначених методів ґрунтується на зниженні рівня внутрісистемних завад, що, як відомо, веде до підвищення завадостійкості.

В цій роботі досліджується варіант зниження потоку внутрісистемних завад за рахунок управління потоками сигналів запиту в запитальних інформаційних системах, що дозволяє підвищити завадостійкість зазначених інформаційних систем.

Слід зазначити, що потік сигналів запиту на вході літакового відповідача є сумою потоків сигналів запиту $\lambda_i(t)$ $(N-1)$ запитувачів, в зоні дії яких знаходиться літаковий відповідач. Цей потік сигналів запиту може бути записано в наступному виді:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^{N-1} \alpha_i(t) \beta_i(t),$$

де

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } \xi_i + mT_{zi} \leq T(t) < \xi_i + mT_{zi} + \tau_0; \\ 0, & \text{при інших } T(t); \end{cases}$$

ξ_i – початкова фаза потоку; $\alpha_i(t)$ – випадкова величина з рівномірною щільністю розподілення на часовому інтервалі $[0, T_{zi}]$, τ_0 – тривалість імпульсів потоку сигналів запиту;

$$\beta_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } \mu_i + sT_{oi} \leq T(t) < \mu_i + sT_{oi} + \Delta t_i; \\ 0, & \text{при інших } T(t); \end{cases}$$

Δt_i – тривалість пачки сигналів запиту.

З зазначеного вище можливо зробити висновок, що інтенсивність потоку сигналів запиту $\lambda_s(t)$ повністю визначається параметрами чотирьох типів N_i, t_i, T_{zi}, T_{oi} . Число запитальних інформаційних систем N та ширина діаграми спрямованості антен запитальних інформаційних систем, як правило, відомі. Таким чином, залишаються два параметри, змінюючи які, можна проводити зміну властивості потоку сигналів запиту в потрібному напрямку, використовуючи певні інформаційні критерії. Так, в якості такого критерію може бути використана дисперсія числа сигналів відповіді у пачці сигналів відповіді. Дійсно, мінімум цієї дисперсії виконується в тому випадку, коли сума кореляційних моментів дорівнює нулю, що вказує на незалежність або некорельованість станів літакового відповідача запитальної інформаційної системи у моменти надходження на його вхід i -го та j -го сигналів запиту

конкретного запитувача. При цьому слід зазначити, що умова некорельованості виконується у тому випадку, якщо період слідування сигналів запиту запитувачів інформаційної системи, що розглядається, обраний так, що $\tau = kT_{z0}$ потрапляють у проміжки між пелюстками кореляційної функції процесу обслуговування сигналів запиту. Так як кожний з N вторинних інформаційних радіолокаторів може вважатися визначеним, то періоди слідування сигналів запиту кожної запитальної інформаційної системи повинні задовольняти умові збереження незалежності потоків сигналів запиту $\lambda_i(t)$, для чого повинні бути виконані наступні умови:

$$\begin{aligned} m_r T_{zr} &= m_s T_{zs}, \quad s, r = 1, 2, \dots, N, \quad s \neq r, \\ m_r T_{zr} &= m_0 T_{z0} \quad \text{та} \quad |T_{zt} - T_{z0}| > 2t_0, \end{aligned}$$

де m_r, m_s – цілі нескорочувані числа; t_0 – час обслуговування сигналів запиту у літаковому відповідачі; T_{z0} – період повторення сигналів запиту запитувача, що розглядається.

Таким чином, наведений спосіб управління потоками сигналів запиту в мережі запитальних інформаційних систем не передбачає взаємодії потоків сигналів запиту. Однак, як впливає із процесу функціонування існуючих вторинних радіолокаторів, які розглядаються, вище наведені умови незалежності потоків сигналів запиту можна дещо послабити. Це обумовлено тим, що для роботи систем радіолокаційної ідентифікації за ознакою свій-чужий достатньо обслуговування тільки певної кількості сигналів запиту [1].

Будемо вважати, що набір періодів слідування сигналів запиту запитальної інформаційної системи, що розглядається, та інших вторинних радіолокаторів задовольняє критерію обмеженої взаємодії, якщо виконується рівність

$$r_m = m - k.$$

Як слідує з цього виразу, обмежена взаємодія обрана так, що за всю пачку сигналів запиту виявиться така частина сигналів відповіді літакового відповідача, що у запитувачі відбудеться виконання критерію початку пачки сигналів.

Визначимо вимоги, у яких набір періодів повторення сигналів запиту задовольняє критерію обмеженої взаємодії. Для цього розглянемо найпростіший випадок – взаємодія двох запитальних послідовностей. Нехай на вхід літакового відповідача з кінцевим часом обслуговування одночасно надходять послідовності сигналів запиту двох радіолокаторів.

Назвемо інтервалом взаємодії i -ї та j -ї послідовностей число V_{ij} – це число періодів повторення між можливими втратами сигналів запиту i -ї послідовності внаслідок зайнятості літакового відповідача обслуговуванням j -ї послідовності. Очевидно, що при однакових періодах повторення $V_{12} - V_{21} = 1$ можливо показати, що для $V_{12} = k'$ при деякому цілому числі n' маємо

$$k'T - t_0 < n'(T + \Delta T) < k'T + t_0, \quad (1)$$

де $T, \Delta T, t_0$ – в загальному випадку довільні позитивні дійсні числа, що визначаються обраною одиницею виміру часу.

З другої сторони, якщо послідовність сигналів запиту, що аналізується, є послідовністю з періодом $T + \Delta T$, то $V_{21} = n''$ і деякого цілого числа k'' , то маємо

$$n''(T + \Delta T) - t_0 < k''T < n''(T + \Delta T) + t_0. \quad (2)$$

Кожне з співвідношень (1) та (2) визначає можливі інтервали взаємодії V_{12} і V_{21} та є еквівалентним сукупності рівнянь виду

$$n(T + \Delta T) - kT = \xi, \quad (3)$$

де ξ приймає значення з наступного інтервалу:

$$\overline{-t_0, +t_0}; n = n' = n'' = V_{21}; k = k' = k'' = V_{12}.$$

Здійснимо перехід від сукупності (3) до аналогічної сукупності в цілих числах. Коли позначити $[a]$ як цілу частину числа a , ввести позначення $T - [T] = \alpha$; $\Delta T - [\Delta T] = \beta$; $\xi - |\xi| = \gamma$ та коли для деяких n^*, k^*, ξ^* задовольняється одне з рівнянь сукупності (3), то маємо

$$n^* (|T| + \alpha + |\Delta T| + \beta) - k^* (|T| + \alpha) = |\xi^*| + \gamma$$

або

$$n^* (|T| + |\Delta T|) - k^* (|T|) = |\xi^*| - \Theta, \quad (4)$$

де $\Theta = \{n^* (\alpha + \beta) - k^* \alpha - \gamma^*\}$ – ціле число.

Так як значення n^* та k^* фіксовані, то при виборі достатньо малої одиниці вимірювання часу маємо наступну нерівність $\Theta \ll t_0$. Звідси з точністю для всіх $[\xi] < [t_0] - \Theta$ множини рішень рівнянь із сукупності (3) збігаються з рішеннями рівнянь сукупності

$$n(|T| + |\Delta T|) - k(|T|) = \xi, \quad (5)$$

для кожного цілого ξ з інтервалу $-t_0, +t_0$.

Таким чином, множину інтервалів взаємодії може бути знайдено рішенням рівняння виду (5). При цьому слід зазначити, що для досліджень становлять інтерес лише рішення, яким відповідають мінімальні значення інтервалів взаємодії. Далі будемо використовувати лише цілі числа.

Відомо, що рівняння виду

$$n(T + \Delta T) - kT = \xi \quad (6)$$

вирішуються тільки тоді, коли найбільший спільний дільник $(T, \Delta T)$ чисел T та ΔT ділить ξ .

В залежності від значення $(T, \Delta T)$ кількість розв'язних рівнянь сукупності (6) дорівнює одному при $(T, \Delta T) > t_0$ та не більше $2t_0 + 1$ при $(T, \Delta T) < t_0$.

Будемо вважати, що n^* та k^* є найменші позитивні рішення рівняння (6). Тоді n^* задовольняє співвідношенню

$$n\Delta T / (T, \Delta T) = \frac{\xi}{(T, \Delta T)} \bmod \frac{T}{(T, \Delta T)}. \quad (7)$$

При цьому слід зазначити, що k^* можливо визначити за виразом

$$k^* = \frac{|\xi - n^* (T + \Delta T)|}{T}. \quad (8)$$

Серед різних способів розв'язання виразу (7) у нашому випадку найбільш зручним способом може бути перетворення коефіцієнтів. У цьому способі перебуває найменше позитивне число s , таке, що ΔT ділить $\xi + sT$, тоді

$$n^* = (\xi + sT) / \Delta T. \quad (9)$$

Необхідна кількість випробувань вибирається з числа елементів повної системи відрахувань за модулем $\Delta T / (T, \Delta T)$. Крім того, коли виконується умова

$$\Delta T / (T, \Delta T) = \eta \bmod \{\Delta T / T, \Delta T\},$$

то для шуканого s число $\xi + s\eta$ ділиться на ΔT .

З урахуванням викладеного та відповідно до виразу (9) за $s = \Delta T / (T, \Delta T)$ та умови (8), отримуємо

$$n^* = \frac{T}{(T, \Delta T)}; k^* = n^* + \frac{\Delta T}{(T, \Delta T)}. \quad (10)$$

Розглянемо вибір періодів повторення сигналів запиту в мережі із двох радіолокаторів. Для того щоб набір періодів слідування $T_1 = T$ й $T_2 = T + \Delta T$ задовольняв критерію обмеженої взаємодії, необхідно T і ΔT вибрати так, щоб мінімальні значення інтервалів взаємодії перевищували число $m - k$. Зазвичай, значення ΔT бажано вибрати мінімально можливим. Якщо $\Delta T = t_0 + 1$, то найкращим вибором відповідають значення T_1 , що дорівнюють

$$T_1 = T = a(t_0 + 1),$$

де a – будь-яке ціле число, яке більше за число $m - k$.

Так, у разі $(T, \Delta T) = t_0 + 1$ і відповідно до виразу (10) отримуємо єдине значення V_{12} , що дорівнює $n^* = T / (t_0 + 1) = a$.

При практичному виборі періодів повторення сигналів запиту мережі запитальних інформаційних систем з обмеженою взаємодією потоків сигналів запиту можливо використовувати наступний алгоритм, що дозволяє просто визначити набір періодів повторення. Дійсно, при заданому часі обслуговування сигналів запиту вибирається період повторення першого вторинного радіолокатора так, що

$$T_1 = a(t_0 + 1),$$

де $a > m - k$. Тоді періоди слідування сигналів запиту інших запитальних інформаційних систем можливо вважаємо рівними

$$T_i = T_1 + (i - 1)(t_0 + 1), \quad i = 2, 3, \dots, N.$$

Таким чином, правильний вибір періодів повторення сигналів запиту в районі спільної дії запитальних інформаційних систем дозволяє значно зменшити ймовірність взаємодії окремих сигналів запиту і, як наслідок, дозволяє підвищити завадостійкість всіх запитальних інформаційних систем, що входять до зазначеної інформаційної системи.

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- правильний вибір періодів повторення сигналів запиту в районі спільної дії запитувачів інформаційних систем, що розглядаються, дозволяє зменшити ймовірність взаємодії окремих сигналів запиту і, як наслідок, дозволяє підвищити завадостійкість запитальних інформаційних систем, які входять до зазначеної інформаційної системи;
- при управлінні потоками сигналів запиту в мережі запитальних інформаційних систем можливо підвищити ймовірність якості обслуговування сигналів запиту літаковим відповідачем, а отже, і всією запитальною інформаційною системою.

Список літератури:

1. Свид І.В., Обод І.І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. Харків: Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.

2. Васишин В.І., Лебедєв В.О., Висоцький О.В., Коцюба В.П. Вторинна радіолокація як основа сучасних систем спостереження за повітряною обстановкою // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2021. № 2(43). С. 94–103. <https://doi.org/10.30748/nipts.2021.43.13>.
3. Обод І.І., Свид І.В. Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об'єктів запитальними системами спостереження // Системи обробки інформації. 2010. Вип. 9 (90). С. 74–76.
4. Svyd I. V. Comparative analysis of the quality of detection of air objects by secondary radar systems // Radiotekhnika. 2023. No. 213. P. 78–87. doi:10.30837/rt.2023.2.213.09.
5. Обод І.І., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // Зб. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2013. № 1(34). С. 123–125.
6. Svyd I. V. et al. Optimal measurement of signal data parameters of requesting radar systems // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021. doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575235
7. Obod I. I. Integrated coordinate-and-time support for the Address Inquiry in the secondary radar systems // Telecommunications and Radio Engineering. 1999. Vol. 53, no. 3. P. 54–56, doi:10.1615/telecomradeng.v53.i3.100
8. Свид І.В. Показники якості інформаційного забезпечення користувачів сполученими системами спостереження повітряного простору // Радіотехніка. 2011. Вип. 165. 2011. С. 157–160.
9. Beel J. J. Anti-UAV Defense For Ground Forces and Hypervelocity Rocket Lethality Models. Monterey, California : Naval Postgraduate School, 1992. pp. 36–46.
10. Moses A., Rutherford M. J. and Valavanis K. P. Radar-based detection and identification for Miniature Air Vehicles // 2011 IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2011. doi:10.1109/csa.2011.6044363
11. Sadasivan S., Gurubasavaraj M., Sekar S.R. Acoustic signature of an unmanned air vehicle – exploitation for aircraft localisation and parameter estimation // Eronautical DEF SCI J. 2001. Vol. 51, № 3. P. 279–283.
12. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Структура та показники якості обробки інформації систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2013. № 8(115). С. 80–83.
13. Svyd I. et al. Optimizing the request signals detection of aircraft secondary radar system transponders // 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2022. doi:10.1109/elnano54667.2022.9926991
14. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2015. № 9(134). С. 96–98.
15. Свид І.В., Обод А.І. Інформаційні технології обробки даних систем спостереження // Системи управління, навігації та зв'язку. Полтава : Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. 2016. Вип. 4 (40). С. 91–93.
16. Обод І.І., Шевцова В.В. Пропускна спроможність відповідачів запитальних систем передачі польотної інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 1(108). С. 105–108.
17. Andrusевич V., Obod I. Assessment of the quality of information support by air radar surveillance systems // Advanced Information Systems. 2021. Vol. 5, No. 2, s.78–82. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.2.10>.
18. Semenets V. et al. Method of increasing the relative throughput of requesting radar systems // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 1, no. 11. P. 99–103. doi: 10.15199/48.2022.11.17.
19. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Методи підвищення якості інформаційного забезпечення системами спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2014. № 4(120). С. 53–55.
20. Pavlova D. B. et al., Comparative analysis of data consolidation in Surveillance Networks // 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2019. doi:10.1109/dessert.2019.8770008.
21. Obod I. et al., Optimization of the quality of information support for consumers of Cooperative Surveillance Systems // Data-Centric Business and Applications. 2020. P. 133–155, doi:10.1007/978-3-030-43070-2_8.

Надійшла до редколегії 26.08.2023

Відомості про авторів:

Свид Ірина Вікторівна – канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: iryna.svyd@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4635-6542>

Сухоруков Дмитро Олексійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: dmytro.sukhorukov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5772-286X>

Коротіч Олексій Віталійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: oleksii.korotich@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7213-6666>

Мачоніс Тадас Сігігасович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: tadas.machonis@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7656-2948>