

М.Г. ТКАЧ

ОЦІНКА ВІДНОСНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЛІТАКОВИХ ВІДПОВІДАЧІВ ВТОРИННИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Вступ

Значну роль в інформаційному забезпеченні систем контролю повітряного простору і управління повітряним рухом відіграють вторинні радіолокаційні системи (ВРС) спостереження повітряного простору. ВРС забезпечують радіолокаційне спостереження за повітряними об'єктами (ПО), обладнаними літаковими відповідачами (ЛВ) і забезпечують двосторонній зв'язок за каналами запиту та відповіді для передачі даних між наземними радіолокаційними станціями та повітряними об'єктами. До ВРС відносяться вторинні оглядові радіолокатори [1 – 10] та системи ідентифікації за ознакою «свій-чужий» [11 – 21]. При цьому слід зазначити, що ВРС можна розглядати, як двочастотну систему передачі даних, одна частота (1030 МГц) використовується для передачі сигналів запиту, а друга (1090 МГц) – для передачі сигналів відповіді [22 – 25]. ВРС має режими роботи 1, 2, 3, 4 та 5 (для військового призначення) та А, В, С, D та S (для цивільного призначення). Однак режим 4 в теперішній час не схвалений для використання у військовій сфері, а режим 5 є беззапитальним та більш безпечним. Основні концепції режиму S були використані у режимі 5 [26 – 30], який являє собою просто криптографічно закодовану версію даних режиму S та ADS-B [31, 32].

Найбільш вразливим місцем у вторинних радіолокаційних системах, що істотно обмежує можливість ідентифікації повітряних об'єктів, є літаковий відповідач [33 – 38]. Дійсно, він побудований за принципом відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами, що викликає труднощі при роботі останніх при значній інтенсивності потоків як внутрісистемних, так і навмисних корельованих завад. Така побудова літакового відповідача викликає суттєві недоліки в безпеці як його, так і в безпеці всієї системи. Це зазначається в значній кількості робіт, зокрема в [7, 8, 15]. Використання ж єдиної частоти у каналі запиту в таких системах призводить до високої щільності сигналів запиту і, як наслідок, до внутрісистемних завад [22 – 25] значної інтенсивності. Зазначені фактори призводять до зниження якості обробки сигнальних даних, тобто до зниження пропускної здатності літакового відповідача.

При цьому слід зазначити, що основними функціями ВРС є:

- отримання польотних даних з борту повітряного об'єкта;
- ідентифікація виявленого повітряного об'єкта за ознакою «свій-чужий».

Побудова ВРС на принципах радіолокаційних систем спостереження, що передбачає оцінку координат ПО на запитувачі, суттєвим чином впливає на можливість отримання польотних даних, що передаються з літакового відповідача.

Метою роботи є оцінка відносної пропускної здатності літакових відповідачів вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору при дії в каналі запиту корельованих та некорельованих завад.

Оцінка відносної пропускної здатності літакових відповідачів вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору

Відомо, що вторинні радіолокаційні системи оцінюють виявлений повітряний об'єкт за ознакою «свій-чужий», тобто являються системами ідентифікації (IFF) [1, 5, 11 – 14] та отримують польотні дані з борту виявленого ПО. Однак, як показано в значній кількості робіт [1, 4, 15 – 18], вторинні радіолокаційні системи, побудовані так, що зацікавлена сторона може несанкціоновано використати цей інформаційний ресурс як для дальнього визначення

координат повітряних об'єктів, з одного боку, так і для перекручування інформації цього інформаційного ресурсу, з другого боку, що призводить до непередбачуваних результатів.

ВРС здійснюють спостереження за повітряними об'єктами, обладнаними літаковими відповідачами і забезпечують двосторонній зв'язок за каналом передачі даних між наземними станціями і повітряними об'єктами. ВРС відноситься до основних інформаційних джерел як системи контролю повітряного простору, так і системи управління повітряним рухом. ВРС повинна вирішувати завдання ідентифікації повітряного об'єкта за ознакою «свій-чужий» як в інтересах визначення ступеня небезпеки виявленого повітряного об'єкта, так і при безпосередньому застосуванні зброї. Рішення завдання ВРС за ознакою «свій-чужий» полягає в ухваленні рішення про виявлення повітряного об'єкта зазначеною інформаційною системою. Імітостійка (криптографічна) ідентифікація повітряних об'єктів, що реалізована в існуючих ВРС, дозволяє однозначно вирішити питання за ознакою «свій-чужий» і є важливою умовою функціонування єдиного інформаційно-комунікаційного простору. Найбільш вразливим місцем в ВРС, що суттєво обмежує пропускну здатність вторинних радіолокаційних систем спостереження, в цілому, є літаковий відповідач [17, 18]. Він побудований за принципом відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами, що викликає труднощі при роботі останніх при значних щільностях потоків як внутрісистемних завад [19], так і навмисних корельованих завад. Така побудова літакового відповідача викликає суттєві недоліки в безпеці як його, так і всієї ВРС. Використання ж єдиної частоти у каналі запиту системи, що розглядається, призводить до високої щільності сигналів запиту і, як наслідок, – до внутрісистемних завад [20] значної інтенсивності. Зазначені фактори призводять до зниження якості обробки сигнальних даних та зниження пропускну здатності ЛВ. Так, в роботі [21] наводиться характеристика середовища щодо оцінки характеристик сучасних вторинних радіолокаційних приймачів спостереження. Основна увага приділяється параметрам, що дають точну характеристику явищ завад, які суттєво обмежують продуктивність даної системи. В роботах [22 – 25] розглядаються питання оптимального виявлення сигналів запиту при однакових рівнях як сигналів запиту, так і завад, які надходять на літаковий відповідач, що представляє собою ідеальний випадок.

Побудова літакового відповідача за принципом одноканальної системи обслуговування сигналів запиту з відмовами визначила значну часову паралізацію літакового відповідача на час обслуговування попереднього сигналу відповіді, що призводить до суттєвих обмежень як відносно пропускну здатності літакового відповідача, так і до суттєвого зниження пропускну здатності усієї вторинної радіолокаційної системи.

Слід зазначити, що основними найбільш ефективними завадами для відповідачів є ненавмисні та навмисних корельовані завади (КЗ). Це обумовлено тим, що існуюча мережа запитувачів та літакових відповідачів (ЛВ) побудована на принципі несинхронній мережі, а сам ЛВ – на принципі одноканальної системи масового обслуговування з відмовами. Вплив потоку сигналів запиту (ПСЗ) призводить до паралізації ЛВ на час, який визначається режимом запиту. Зазначимо, що при прийомі сигналів запиту (СЗ) за основною пелюсткою діаграми спрямованості антени (ДСА) запитувача ЛВ повністю паралізується на час обслуговування, при прийомі СЗ по бічних пелюстках ДСА ЛВ паралізується на час між імпульсом СЗ (амплітуда якого запам'ятовується) та імпульсом подавлення бічних пелюсток (ПБП) навмисних корельованих завад (навмисна або ненавмисна). Це впливає на роботу ЛВ двоюко:

- по-перше, пригнічує окремі імпульси СЗ, що робить неможливим обслуговування даного СЗ;
- по-друге, паралізує ЛВ через утворення хибних СЗ (хибна тривога першого і другого роду).

Оцінимо пропускну здатність ЛВ при впливі вказаних завад. При надходженні на вхід ЛВ потоків СЗ і навмисних корельованих завад відповідач не сформує СВ, якщо станеться хоча б одна з таких несприятливих ситуацій:

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через утворення з навмисних корельова-

них завад випереджаючих хибних СЗ (хибна тривога першого роду), які призводять до випромінювання СВ або спрацьовування схеми ПБП (імовірність P_1);

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через випереджаючі СЗ сусідніх запитувачів або КЗ (імовірність P_2);

- окремі імпульси СЗ запитувача, що розглядається, подавляться на високій частоті через збіг за часом імпульсів різних СЗ при несприятливих фазових співвідношеннях (імовірність P_3);

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через випереджаючі хибні СЗ, що утворюються при взаємодії першого імпульсу СЗ даного запитувача з випереджаючими (на базу коду) імпульсами навмисних корельованих завад або СЗ (хибна тривога другого роду) і призводять до випромінювання СВ або спрацьовування схеми ПБП (імовірність P_4);

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через появу на позиції сигналу хибного імпульсу подавлення, який утворився з завад (імовірність P_5);

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через спрацьовування схеми часової селекції відповідей (імовірність P_6);

- СЗ запитувача, що розглядається, подавиться через інерційність схем вхідних формувачів дешифратора і обмеження завантаження відповідача (імовірність P_7).

Визначимо імовірності цих подій в припущенні, що потоки СЗ і навмисних корельованих завад впливають на СЗ розглядаемого запитувача незалежно один від одного та кількості джерел, що формують загальний потік СЗ, достатньо велика для загальної характеристики потоку як пуассонівського.

Будемо вважати, що на вхід літакового відповідача поступають:

- потік навмисних корельованих завад інтенсивністю λ_0 ;

- потік СЗ інтенсивністю λ_1 , який включає ПСЗ сусідніх запитувачів і потік КЗ;

- потік СЗ, які викликають спрацьовування схеми ПБП, інтенсивністю λ_2 .

Припустимо, що тривалість імпульсів потоку СЗ однакова, незмінна за часом і збігається з тривалістю імпульсів корисного сигналу. Припустимо також, що загальні потоки СЗ складаються з k частин неімітостійкого режиму та $(1 - k)$ частин імітостійкого режиму.

Сумісна дія навмисних корельованих завад і ПСЗ призводить до високочастотного подавлення окремих імпульсів ПСЗ при несприятливих фазових співвідношеннях, внаслідок чого інтенсивність ПСЗ зменшується.

Імовірність того, що хоча б один імпульс навмисних корельованих завад збіжиться за часом з імпульсом ПСЗ та подавить його, становить

$$P_n = \gamma [1 - \exp(-\lambda_0 \tau_0)],$$

де γ – коефіцієнт інтерференційного подавлення, який визначає імовірність інтерференційного подавлення імпульсу прийнятого СЗ при його збіжності за часом з імпульсом завади.

Через високочастотне подавлення зменшується інтенсивність потоку СЗ, які викликають випромінювання СВ:

$$\lambda_1^1 = \lambda_1 (1 - P_n)^n,$$

та інтенсивність ПСЗ, які викликають спрацьовування схеми ПБП:

$$\lambda_2^1 = \lambda_2 (1 - P_n)^n,$$

де n – кількість імпульсів у СЗ.

Імовірність того, що хоча б один СЗ потрапить в випереджаючий інтервал та подавить СЗ ВРС, що розглядається, за рахунок часу паралізації t_1 ЛВ у неімітостійкому режимі при

випромінюванні СВ, визначається для навмисних корельованих завад та ПСЗ відповідно:

$$P_1^1 = 1 - \exp(-\lambda_x t_1) \quad \text{та} \quad P_1^2 = 1 - \exp(-k\lambda_1 t_1),$$

де λ_x – середня кількість хибних n -імпульсних кодів, що призводять до випромінювання СВ;
 $k = \lambda_n / \lambda_1$ – відносна частка неімітостійкого режиму в загальній інтенсивності потоку СЗ;
 λ_n – інтенсивність потоку СЗ неімітостійкого режиму.

Середню кількість хибних n -імпульсних кодів, які призводять до випромінювання СВ, можна визначити за формулою

$$\lambda_x = n\tau_0^n \lambda_0^{n-1} (1 - \tau_c / \tau_0),$$

де τ_c – тривалість селекції імпульсів за часом.

Імовірність того, що хоча б один СЗ потрапить в випереджаючий інтервал і подавить СЗ розглядаємої ВРС за рахунок часу паралізації t_2 ЛВ в імітостійкому режимі при випромінюванні СВ, від навмисних корельованих завад та ПСЗ визначається за виразами:

$$P_1^3 = 1 - \exp(-\lambda_x t_2), \quad P_1^4 = 1 - \exp[-(1-k)\lambda_1 t_2].$$

Результуюча імовірність подавлення СЗ даного запитувача системи через паралізацію відповідача при випромінюванні СВ складає

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_1^i).$$

Імовірність P_2 того, що хоча б один СЗ попаде в випереджаючий інтервал і подавить СЗ, що розглядається, за рахунок часу паралізації t_3 ЛВ при спрацьовуванні схеми ПБП від навмисних корельованих завад чи від ПСЗ в неімітостійкому режимі, визначається відповідно:

$$P_2^1 = 1 - \exp(-\lambda_x t_3), \quad P_2^2 = 1 - \exp(-k\lambda_2 t_3).$$

Імовірність того, що хоча б один СЗ попаде в випереджаючий інтервал і подавить СЗ ВРС, що розглядається, за рахунок часу паралізації t_4 ЛВ при спрацьовуванні схеми ПБП в імітостійкому режимі від навмисних корельованих завад та від ПСЗ, визначається відповідно:

$$P_2^3 = 1 - \exp(-\lambda_x t_4), \quad P_2^4 = 1 - \exp[-(1-k)\lambda_2 t_4].$$

Результуюча імовірність подавлення СЗ даного запитувача ВРС, що розглядається, через паралізацію відповідача при прийманні СЗ по бічних пелюстках ДСА запитувача становить

$$P_2 = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_2^i).$$

Імовірність подавлення одного будь-якого імпульсу СЗ даного запитувача через збіжність з імпульсами потоків навмисних корельованих завад і СЗ становить

$$P_{10} = \gamma [1 - \exp(-\lambda_c \tau_0)],$$

де $\lambda_c = \lambda_0 + \lambda_1^1 + \lambda_2^1$ – інтенсивність сумарного потоку завад та СЗ.

З урахуванням n імпульсів СЗ імовірність подавлення сигналу запиту складає

$$P_3 = 1 - (1 - P_{10})^n$$

Імовірність P_4 подавлення СЗ ВРС, що розглядається, через появу випереджаючих хибних кодів запиту, що утворюються в результаті взаємодії першого імпульсу коду запиту з випереджаючими імпульсами ПСЗ і призводять до випромінювання СВ або спрацьовування схеми подавлення бічних пелюсток, визначається співвідношенням

$$P_4 = (1 - P_{01})^n [1 - (1 - P_{10})^{n+1}].$$

Інший співмножник враховує можливі ситуації утворення хибних випереджаючих кодів запиту: n кодів запиту, що призводять до випромінювання коду відповіді, і одного коду сигналу подавлення, який призводить до спрацьовування схеми ПБП.

Імовірність хибної тривоги другого роду P_{01} визначається за формулою

$$P_{01} = 1 - \exp(-\lambda_c \tau_0).$$

Імовірність P_5 подавлення запиту запитувача, що розглядається, через появу на позиції сигналу хибного імпульсу подавлення, який утворився з завад, визначається за формулою

$$P_5 = (1 - P_{10})^n P_{01}^{n-1}.$$

Імовірність P_6 подавлення СЗ в результаті спрацьовування схем часової селекції відповідей визначається співвідношенням

$$P_6 = 1 - \exp(-2\lambda_c \tau_0).$$

Імовірність P_7 подавлення кодів запиту через інерційність вхідних формувачів ЛВ визначається за формулою

$$P_7 = 1 - (1 - P_f)^n,$$

де $P_f = 1 - \exp(-\lambda_c \tau_f)$ – імовірність подавлення одного імпульсу коду через інерційність формувача.

Якщо середня кількість СЗ перевищує припустиму величину завантаження ЛВ λ_M , то імовірність відповіді при роботі схеми обмеження завантаження ЛВ зменшується і становить $P_{лв} = \lambda_M / \lambda_3$, де $\lambda_3 = \lambda_1 + \lambda_2$.

Імовірність випромінювання СВ ЛВ на запит запитувача, що розглядається, яка і є ВПЗ становить:

при $\lambda_3 < \lambda_M$
$$C_0 = \prod_{i=1}^7 (1 - P_i),$$

при $\lambda_3 > \lambda_M$
$$C_0 = P_{лв} \prod_{i=1}^7 (1 - P_i).$$

Розрахунки за наведеними виразами наведені на рис. 1 – 3. При цьому вважали, що інтенсивність потоку навмисних корельованих завад $\lambda_0 = 0; 2 \cdot 10^4; 4 \cdot 10^4$, а інтенсивність λ_1 ПСЗ, які призводять до випромінювання сигналу відповіді, в п'ять разів менше інтенсивності λ_2 потоку СЗ, які викликають спрацьовування схеми ПБП. Розрахунки наведено для коефіцієнтів $k = 0,5; 0,25; 0,1$.

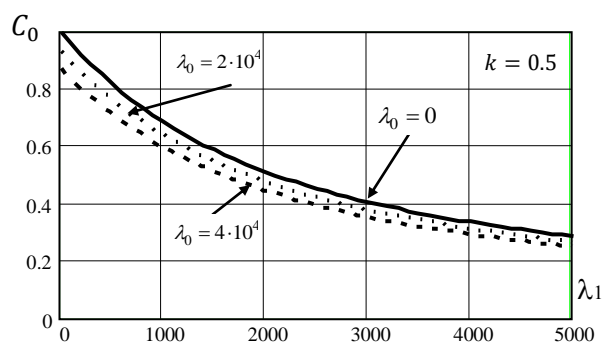


Рис. 1. Оцінка пропускної здатності літакового відповідача

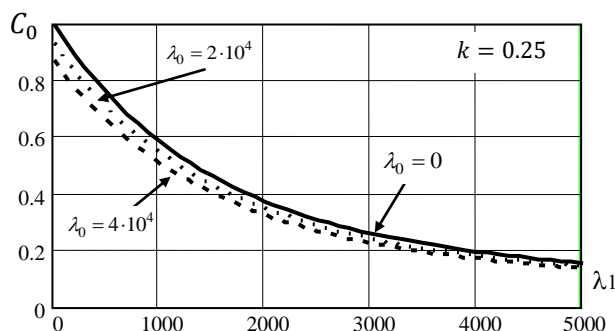


Рис. 2. Оцінка пропускної здатності літакового відповідача

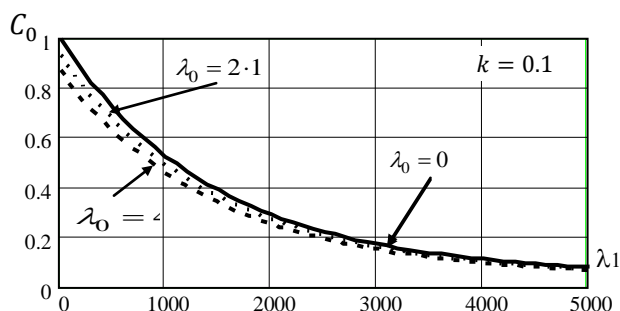


Рис.3. Оцінка пропускної здатності літакового відповідача

З наведених результатів можна зробити наступні висновки:

Збільшення інтенсивності потоку сигналів запиту призводить до різкого зниження коефіцієнта готовності літакового відповідача, що вказує на низьку пропускну здатність ЛВ (і вторинних радіолокаційних систем в цілому). Дійсно, з рис. 1 – 3 видно, що постановка навмисних корельованих завад інтенсивністю 5000 призводить до зниження відносної пропускної здатності літакового відповідача з 1 до 0,3.

Некорельовані завади порівняно слабо впливають на пропускну здатність ЛВ. Так, при $k = 0,5$ і наявності ПСЗ $\lambda_1 = 5000$ вплив інтенсивних некорельованих завад ($\lambda_0 = 40000$) призводить до порівняно незначного зниження пропускної здатності ЛВ з 0,3 до 0,27. Це означає, що найбільш небезпечною для вторинних радіолокаційних систем є навмисна корельована завада. Ця обставина дозволяє стверджувати, що основним видом завад при подавленні вторинних радіолокаційних систем у системному плані є постановка навмисних корельованих завад. З розрахунку виходить, що інтенсивність потоку СЗ, яка дорівнює 5000, що потребує випромінюванню 10000 імпульсів більш ніж на порядок ефективніше за випромінювання 40000 імпульсів некорельованої завади.

Збільшення частки імітостійкого режиму в загальному ПСЗ призводить до суттєвого зниження пропускної здатності ЛВ. Так, при відсутності некорельованих завад ($\lambda_0 = 0$) та при інтенсивності ПСЗ $\lambda_1 = 4000$ збільшення частки імітостійкого режиму з 0,5 до 0,9 призводить до зменшення пропускної здатності ЛВ майже втричі – з 0,35 до 0,12.

Проведена оцінка пропускної здатності ЛВ показує, що ЛВ не досягає максимального завантаження, яке закладено в діючу систему ідентифікації при дії навмисних корельованих завад. Розрахунки показують, що кількість відповідей ЛВ ніколи не досягає такого значення. Це вказує на неправильне визначення коефіцієнта завантаження, через що ЛВ існуючої ВРС не буде відсіювати СЗ малої потужності. Неправильне визначення максимального завантаження ЛВ призводить до зниження завадостійкості як ЛВ, так і всієї ВРС. При цьому слід зазначити, що зацікавлена сторона буде несанкціоновано використовувати ЛВ і отримувати від нього інформацію або паралізувати його застосуванням завад потрібної інтенсивності за допомогою одного запитувача, розташованого на значній відстані.

Висновки

Збільшення інтенсивності потоку сигналів запиту призводить до різкого зниження відносної пропускної здатності ЛВ, що вказує на низьку пропускну здатність існуючих літакових відповідачів.

Некорельовані завади порівняно слабо впливають на відносну пропускну здатність. При цьому цей вплив значно зменшується при досягненні ЛВ припустимої величини завантаження.

Збільшення частки імітостійкого режиму ідентифікації за ознакою «свій-чужий» в загальному потоку сигналів запиту призводить до зниження відносної пропускної здатності ЛВ.

Невірний вибір максимального завантаження ЛВ призвів до зниження характеристик як ЛВ, так і всієї вторинної радіолокаційної системи за рахунок відсутності виключення з обслуговування СЗ запитувачів котрі знаходяться значній дальності від ЛВ.

Список літератури:

1. Маляренко А.С. Системи вторичної радіолокації для управління повітряним рухом і державного радіолокаційного опознання [Справочник]. Харків : ХУПС, 2007. 78 с.
2. Kim E. and Sivits K. Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance // *Aerospace Science and Technology*, vol. 45, 2015, pp. 203-208.
3. Guofeng Jiang; Yangyu Fan; Hongbo Yuan. Assessing the Capacity of Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar System // 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). doi: 10.1109/CSQRWC.2019.8799146.
4. Semenets V., Svyd I., Obod I., Maltsev O., Tkach M. Quality Assessment of Measuring the Coordinates of Airborne Objects with a Secondary Surveillance Radar // Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 69. Springer, Cham, pp. 105-125, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_5.
5. Svyd I., Maltsev O., Obod I. and Zavolodko G. Fusion Method of Primary Surveillance Radar Data and IFF systems Data // 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 336-340, doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125040.
6. Обод І.І., Свид І.В. Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об'єктів запитальними системами спостереження // Тематичний збірник «Системи обробки інформації». Вип. 9 (90). Харків : ХУПС, 2010. С. 74-76.
7. Obod I., Svyd I., Maltsev O., Vorgul O., Maistrenko G., Zavolodko G. Optimization of the Quality of Information Support for Consumers of Cooperative Surveillance Systems // Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 48. Springer, Cham, pp. 133-155, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43070-2_8.
8. Obod I., Svyd I., Maltsev O., Zavolodko G., Pavlova D., Maistrenko G. Fusion the Coordinate Data of Airborne Objects in the Networks of Surveillance Radar Observation Systems // Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 48. Springer, Cham, pp. 731-746, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43070-2_31.

9. Черних О.П., Обод І.І., Свид І.В. Інформаційне забезпечення на основі мереж спостереження повітряного простору // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/9(50) 2011. Харків, 2011. С. 23-25. doi: 10.15587/1729-4061.2011.1850.
10. Takuya Otsuyama; Junichi Honda; Kakuichi Shiomi; Gaku Minorikawa; Yusuke Hamanaka. Performance evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for small aircraft surveillance // *European Radar Conference (EuRAD)*, 2015. doi: 10.1109/EuRAD.2015.7346348.
11. STANAG 4193 Document, Technical Characteristics of IFF Mk X and Mk XII Interrogators and Transponders (Part V). Technical Description of the MkXII System, NATO Standard, 2016.
12. Sharifi-Tehrani O., Sadeghi A. and Razavi S. M. J. Design and Simulation of IFF/ATC Antenna for Unmanned Aerial Vehicle // *Majlesi Journal of Mechatronic Systems*, vol. 6, no. 1, Jun. 2017.
13. Poornima P., Roja Reddy B. and Anantha Murthy B. G. Design and Simulation of Two-Chain Monopulse Receiver for IFF Radar Application // 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 1114-1118, doi: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012646.9
14. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Tkachova T. and Zavolodko G. Improving Noise Immunity in Identification Friend or Foe Systems // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 73-77, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879812.
15. Pollack J. and Ranganathan P. Aviation Navigation Systems Security: ADS-B, GPS, IFF // *International Conference on Security & Management, SAM'18, International Conference on Security & Management, SAM'18, Las Vegas, Nevada, USA, 2018*, pp. 129-135.
16. Obod I., Svyd I., Maltsev O. and Bakumenko B. Comparative Analysis of Noise Immunity Systems Identification Friend or Foe // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 751-756, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088856.
17. Svyd I., I. Obod I. Maltsev O. Interference Immunity Assessment Identification Friend or Foe Systems // Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 69. Springer, Cham, pp. 287-306, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_12.
18. Strelnytskyi O., Svyd I., Obod I., Maltsev O., Voloshchuk O. and Zavolodko G. Assessment Reliability of Data in the Identification Friend or Foe Systems // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 728-731, doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783397.
19. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Strelnytskyi O., Zubkov O. and Zavolodko G. Method of Increasing the Identification Friend or Foe Systems Information Security // 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT). Lviv, Ukraine, 2019, pp. 434-438, doi: 10.1109/AIACT.2019.8847853.
20. Schuck T.M.; Shoemaker B.; Willey J. Identification friend-or-foe (IFF) sensor uncertainties, ambiguities, deception and their application to the multi-source fusion process // *Proceedings of the IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow (Cat. No.00CH37093)*. doi: 10.1109/NAECON.2000.894896
21. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Shtykh I. and Zavolodko G. Model and Method for Detecting Request Signals in Identification Friend or Foe Systems // 2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Polyana, Ukraine, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/CADSM.2019.8779322.
22. Poornima P., Roja Reddy B. and Anantha Murthy B. G. Design and Simulation of Two-Chain Monopulse Receiver for IFF Radar Application // 2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 1114-1118. doi: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012646.
23. Otsuyama T., Honda J., Naganawa J. and Miyazaki H. Analysis of signal environment on 1030/1090MHz aeronautical surveillance systems // 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), Singapore, 2018, pp. 71-71, doi: 10.1109/IEMC.2018.8394048.
24. Ozeki Sh., Otsuyama T., Koga T., Sumiya Ya. Error Compensations for 1030 MHz Signal Environment Estimation: The format of Technical Report.
25. Yu Hsuan Chen; Sherman Lo; Per Enge; Shau Shiun Jan. Evaluation & comparison of ranging using Universal Access Transceiver (UAT) and 1090 MHz Mode S Extended Squitter (Mode S ES). 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. doi: 10.1109/PLANS.2014.6851456.
26. Obod I., Svyd I., Vorgul O., Maltsev O., Datsenko O., Boiko N. Optimization of Data Processing Structure for Multi-Position Radar Surveillance Systems // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 133-137, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575286.
27. Li Huan, Zhao Feng, Li Yu Bai, Wang Jian. One Joint Demodulation and Despreading Algorithm for MOD5 // *The Open Automation and Control Systems Journal* 2015 7(1):386-397. doi: 10.2174/1874444301507010386
28. P. Finocchio. Future radars procurement for the Italian Ministry of Defense // 2009 European Radar Conference (EuRAD), 2009, pp. 326-329.
29. Yang Guo; Jianbo Yang; Chunjian Guan. A Mode 5 signal detection method based on phase and amplitude correlation // 2013 Ninth International Conference on Natural Computation (ICNC). doi: 10.1109/ICNC.2013.6818164.

30. E.A. El-Badawy; W.A. EL-Masry; M. A. Mokhtar; Alaa S. Hafez. A secured chaos encrypted mode-S aircraft identification friend or foe (IFF) system // 2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems. doi: 10.1109/ICSPCS.2010.5709756.
31. Edward Ted Lester. Military position source challenges for worldwide ADS-B out compliance // 2013 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). doi: 10.1109/ICNSurv.2013.6548530.
32. Martin Strohmeier. Large-Scale Analysis of Aircraft Transponder Data // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine (Volume: 32, Issue: 1, January 2017). pp. 42 – 44. doi: 10.1109/MAES.2017.160149.
33. United States Navy. Navy Programs: Mark XIIA Identification Friend or Foe (IFF) Mode 5. 2012. Available: http://www.dote.osd.mil/pub/reports/FY2012/pdf/nav_y/2012mkxiiiaiffmode5.pdf.
34. David S. and Vitolo A. J. Airborne IFF transponder antenna system with Omni and steerable cardioid patterns, Aug. 1970, pp. 279-283.
35. Метод підвищення завадозахищеності радіолокаційних систем ідентифікації «свій-чужий» при дії навмисних корельованих завад / І.В. Свид, І.І. Обод, О.С. Мальцев, М.Г. Ткач, С.В. Старокожев, А.О. Глуценко, В.С. Чумак // Радіотехніка. 2021. Вип. 205. С. 154-160. doi:10.30837/rt.2021.2.205.16.
36. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Andrusevich, Vakumenko B., Vorgul O. Optimal Measurement of Signal Data Parameters of Requesting Radar Systems // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 138-141, doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575235.
37. Свид І.В., Обод І.І., Заволодько Г.Е. Оптимізація обробки даних в літакових відповідачах системи ідентифікації «свій-чужий» // Радіотехніка. 2020. Вип. 203. С. 162-169. doi: 10.30837/rt.2020.4.203.16.
38. Evaluation the Quality of Measuring the Coordinates of Air Objects in the Synchronous Information Network of Surveillance Systems / V. Semenets, I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, M. Tkach, V. Chumak // Information systems and technologies IST-2021: Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference, Kharkiv – Odesa, Ukraine, 2021, pp. 23-27.

Надійшла до редколегії 03.11.2021

Відомості про автора:

Ткач Марія Геннадіївна – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки; Україна; email: maria.zavorotna@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4248-7633>