

RADAR AND RADIONAVIGATION РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОНАВІГАЦІЯ

УДК 621.396. 967.2

DOI:10.30837/rt.2023.3.214.09

*І.В. СВИД, канд. техн. наук, І.І. ОБОД, д-р техн. наук,
С.В. ГОЛОВАТЕНКО, С.В. ДАЦЬКО*

ОЦІНКА ЯКОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ КООПЕРАТИВНИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Вступ

Можна зазначити, що в інформаційному забезпеченні системи контролю повітряного простору і управління повітряним рухом велике місце займають кооперативні системи спостереження повітряного простору [1 – 3], до яких належать багатопозиційні радіолокаційні системи [4 – 7], запитальні системи вторинної радіолокації [8 – 12] та системи радіолокаційної ідентифікації за ознакою «свій-чужий» [13 – 17]. Головним завданням зазначених кооперативних систем спостереження повітряного простору є оцінка координат виявлених повітряних об'єктів (ПО) [18 – 20], а також отримання радіолокаційної інформації від ПО та оцінка державної приналежності виявленого ПО [21 – 23]. При цьому слід зазначити, що системи радіолокаційної ідентифікації вирішують завдання ідентифікації виявленого ПО, як на користь визначення ступеня небезпеки виявленого ПО, так і при безпосередньому застосуванні зброї [24 – 27]. Основним елементом, який суттєвим чином знижує якість інформаційного забезпечення кооперативних системам спостереження, є літаковий відповідач [28 – 31]. Ця обставина зумовлена принципом побудови останнього у вигляді відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами [32 – 34], що дозволяє зацікавленій стороні, як отримувати дані від літакового відповідача, що розглядається, так і повністю паралізувати останній постановкою навмисної корельованої завади необхідної інтенсивності [35 – 38]. Наявність просторової багатоканальності прийому сигналів запиту значно розширює структурні можливості при проведенні оптимізації обробки сигнальної інформації у літакових відповідачах, зокрема у варіантах об'єднання попередніх рішень просторових каналів обробки сигналів запиту [39 – 42]. Слід зазначити, що кооперативна обробка радіолокаційної інформації в багатопозиційних радіолокаторах дозволяє отримати потенційно більший обсяг інформації [43 – 47].

Метою запропонованої роботи є оцінка якості визначення координат повітряних об'єктів кооперативними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору.

Класифікація систем радіолокаційного спостереження повітряного простору

Зазначимо, що всі перспективні системи радіолокаційного спостереження повітряного простору, що використовуються в даний час, позначені Комітетом з майбутніх аеронавігаційних систем терміном Surveillance System, поділяються на два основні типи:

- системи залежного спостереження;
- системи незалежного спостереження.

Слід зазначити, що радіолокаційні системи спостереження повітряного простору використовуються органами управління повітряним рухом для визначення місцезнаходження ПО. [28, 48 – 51]. Існує два типи радіолокаційних систем спостереження: кооперативні та некооперативні [52 – 56].

Кооперативні системи: в рамках цієї форми спостереження наземні системи (наприклад, вторинний радіолокатор) обмінюються даними з обладнанням (наприклад, літаковими відповідачами) на борту ПО для визначення розташування та інших характеристик ПО. Інформа-

ція про ПО, яка може включати місце розташування від супутникової системи визначення місцеположення або інших засобів, визначається на борту і потім передається до управління повітряним рухом у відповідь на запит. Інші спільні системи, такі, як ADS-B, налаштовані так, що ПО передають своє місцезнаходження та іншу інформацію без запиту із землі.

Некооперативні системи: при цій формі спостереження наземні системи (такі як первинний радіолокатор) можуть визначити місцезнаходження ПО та вимірювати його положення із землі, передаючи імпульси радіохвиль, що відбиваються від корпусу ПО.

Таким чином, основою служби радіолокаційного спостереження повітряного простору, що надається користувачам, як системи контролю повітряного простору, так і управління повітряного руху може служити сукупність трьох основних видів радіолокаційного спостереження повітряного простору (рис. 1) [56 – 59].



Рис. 1. Класифікація радіолокаційного спостереження повітряного простору

У незалежних некооперативних радіолокаційних спостереженнях повітряного простору розташування ПО визначається на основі інформації вимірювань без допомоги ПО, що розглядається, що можливе шляхом використання первинних радіолокаційних систем.

Первинні радіолокаційні системи є основним джерелом радіолокаційної інформації про динамічну повітряну обстановку в певній області повітряного простору. Вони призначені для виявлення ПО та визначення координат ПО. Первинні радіолокатори проводять опромінення всіх об'єктів, що потрапляють у межі їхньої зони огляду, та здійснюють прийом сигналів, відбитих цими об'єктами. Аналіз прийнятих сигналів дозволяє отримувати всю необхідну інформацію про рух ПО. Принцип функціонування первинних радіолокаторів аналогічний принципу функціонування звичайної імпульсної радіолокаційної станції, хоча і має деякі специфічні особливості, зумовлені вимогами, властивостями об'єктів, що спостерігаються, і умовами застосування.

Використання первинних радіолокаторів для спостереження повітряної обстановки не вимагає ніякого додаткового устаткування на борту ПО, тобто, така система радіолокаційного спостереження є повністю незалежною. За допомогою первинних радіолокаторів визначаються, як правило, дві координати ПО: похила дальність та азимут. На жаль, третю координату – барометричну висоту ПО – визначити за допомогою первинного радіолокатора складно. Не визначається також інша додаткова польотна інформація, така як індивідуальний номер літака, залишок палива, вектор шляхової швидкості, особливі випадки в польоті й т.п.

Основними недоліками радіолокаційних систем спостереження, що функціонують на базі первинних радіолокаторів, є:

- низька інформативність, пов'язана з відсутністю можливості отримання додаткової польотної інформації;

- велике споживання енергії;
- високий рівень завад, пов'язаний з відбиттями сигналів від місцевих предметів;
- обмеження зони огляду, що визначаються конфігурацією діаграми спрямованості антени у вертикальній площині та необхідністю виконання умови прямої видимості між радіолокатором та ПО.

У зв'язку із зазначеними вище недоліками, а також із розширенням використання сучасних систем спостереження застосування первинних радіолокаторів для огляду повітряного простору поступово скорочується.

Для незалежного кооперативного радіолокаційного спостереження розташування ПО визначається на основі інформації вимірювань, що виконуються підсистемою локального радіолокаційного спостереження з використанням повідомлень з борту ПО. Ці повідомлення можуть містити інформацію, отриману на борту ПО. Цей модуль забезпечує можливість розширення еквівалентного радіолокаційного обслуговування управління повітряного руху на основі двох технологій спостереження, які можуть використовуватись окремо або спільно MLAT [6, 7] та WAM [8, 10]. Ці технології є альтернативою класичному радіолокаційному обслуговуванню, проте для них характерні менші витрати на впровадження та технічне обслуговування, що дозволяє здійснювати радіолокаційне спостереження в тих районах, де в даний час воно не забезпечується з причин географічного або економічного характеру. Крім того, за певних умов ці технології дають змогу скоротити мінімуми ешелонування, що в перспективі розширить можливості обслуговування великих обсягів повітряного руху.

MLAT є технологією, яка забезпечує незалежне кооперативне радіолокаційне спостереження. Розгортання цієї системи сприяє використанню можливостей бортового обладнання режиму S, що забезпечує передачу автоматичних повідомлень. В цьому випадку сигнал, що передається ПО, приймається мережею приймачів, розташованих у різних місцях. Використання різниці в часі отримання сигналів різними приймачами дозволяє незалежно визначати розташування джерела сигналів. Теоретично ця технологія може бути пасивною, яка використовує інформацію, що передається ПО, або активною, що ініціює відповіді аналогічно запитам у режимі S вторинних оглядових радіолокаторів.

Спочатку системи MLAT встановлювалися у великих аеропортах для реалізації спостереження за ПО на поверхні. В даний час ця технологія використовується для ведення спостереження у великих районах (система MLAT із широкою зоною дії WAM [8, 10]). Однак слід зазначити, що у порівнянні з ADS-B для системи MLAT необхідна наявність більшої кількості наземних систем та надійної зв'язаної мережі; крім того, порівняно з ADS-B для цієї системи характерні жорсткіші вимоги до геометрії, проте використання існуючого бортового обладнання режиму A/C забезпечує можливість впровадження цієї системи.

Залежне радіолокаційне спостереження (ADS-B) є перспективною технологією спостереження повітряного простору, що забезпечує можливість радіомовної передачі бортовим електронним обладнанням розпізнавального індексу ПО, інформації про місцезнаходження, висоту, швидкість та іншу інформацію. У порівнянні зі звичайним вторинним оглядовим радіолокатором інформація, що передається в режимі радіомовлення, про місце розташування ПО є більш точною, оскільки, як правило, вона заснована на інформації, що отримується від глобальної навігаційної супутникової системи, та її передача здійснюється не менше одного разу на секунду. Характерна для GPS точність позиціонування та висока швидкість оновлення інформації дозволяють постачальникам обслуговування та користувачам підвищити рівень безпеки польотів, пропускну спроможність та ефективність.

Слід зазначити, що ADS-B залежить від наявності джерела, що забезпечує необхідну точність позиціонування, яким нині є глобальна навігаційна супутникова система визначення місцеположення [60 – 63].

Використання залежного спостереження сприяє підвищенню ефективності роботи пошуково-рятувальних служб, що надаються мережею спостереження. У районах без радіолокаційного обслуговування забезпечується ADS-B точність позиціонування та швидкість

оновлення інформації дозволяють більш ефективно відстежувати траєкторію польоту, що забезпечує можливість своєчасного визначення втрати контакту та оперативного вжиття пошуково-рятувальних служб заходів щодо точного визначення відповідного розташування [64 – 67].

При використанні залежного кооперативного радіолокаційного спостереження місцеположення визначається на борту ПО, і ця інформація передається підсистемі локального спостереження поряд із можливими додатковими даними (наприклад, розпізнавальний індекс ПО, барометрична висота тощо).

Слід зазначити, що кооперативність прийому як відбитих, так і випромінювальних радіолокаційних сигналів є у тому, що це приймальні позиції здатні приймати відбиті сигнали від ПО, опромінених будь-якою передавальною позицією. Тобто, по суті необхідно знайти таку процедуру обробки координатної інформації в мережі радіолокаційних систем спостереження, яка при реалізації кооперативної обробки дозволила б підвищити точність вимірювань дальності, при врахуванні спільної обробки всіх фізично реалізованих незалежних вимірювань похилих дальностей, сумарних дальностей та різниці відстаней [68 – 70].

Також слід звернути увагу на те, що кооперативність обробки радіолокаційної інформації в багатопозиційних радіолокаторах полягає в тому, що всі позиції системи здатні приймати відбиті сигнали від ПО у зоні відповідальності при їх опроміненні будь-якою позицією, що передає, а також і сигнали за даними каналу радіотехнічної розвідки, коли сам ПО є джерелом радіовипромінювання. Така процедура суттєво збільшує обсяг сигнальної і координатної інформації та дозволяє отримати надмірні виміри сумарних дальностей та різниць відстаней, в яких міститься інформація про похилу дальність до ПО. Під надмірністю будемо розуміти вимірювання кількох однорідних фізичних величин (дальностей до ПО, сумарних дальностей та різниць відстаней), які пов'язані між собою будь-яким законом, при якому шукане значення величини (дальності до ПО) одержують шляхом обробки результатів проміжних вимірювань за рівнянням надлишкових вимірів з метою підвищення точності оцінювання.

Крім того слід зазначити, що первинний оглядовий радіолокатор визначає місце розташування ПО на основі прийому відбитих радіолокаційних сигналів, а вторинний радіолокатор використовується для передачі та прийому одержуваної на борту ПО інформації, такої як барометрична висота, розпізнавальний індекс тощо [71 – 73].

Зазначимо, що підвищення достовірності радіолокаційної інформації досягається за рахунок усунення хибних вимірів в багатопозиційній радіолокаційній системі шляхом використання багатопозиційних методів визначення координат ПО, а не за рахунок введення додаткових позицій. Використання багатопозиційних методів визначення координат ПО передбачає значне зменшення імовірності виникнення хибних вимірів без збільшення кількості приймальних позицій.

Крім усього підвищення достовірності радіолокаційної інформації, за рахунок використання кооперативного прийому відбитих сигналів в умовах багатоцільової обстановки, забезпечує зменшення імовірності виникнення хибних вимірів без використання додаткових приймально-передавальних позицій. Усунення хибних вимірів здійснюється за рахунок надмірності вимірів та використання критерію “ k із n ”. При цьому слід зазначити, що надмірність вимірів забезпечується реалізацією сумарно-далекомірного методу без збільшення кількості приймально-передавальних позицій. Так, для випадку трьох позицій імовірність виникнення хибних вимірів в два рази вище при наявності в зоні огляду шести ПО. При розробці перспективних оглядових маловисотних автоматичних радіолокаторів з електронним скануванням та використанням цифрових активних антенних решіток доцільно передбачити режими синхронізації апаратури просторово рознесених радіолокаторів для утворення багатопозиційних радіолокаторів з кооперативним прийомом з метою підвищення живучості, заводо захищеності та підвищення якості радіолокаційної інформації.

Доцільно знайти таку процедуру обробки координатної інформації в системі радіолокаційних систем, яка при реалізації кооперативної обробки інформації дозволить підвищити

точність вимірювань дальності, при врахуванні спільної обробки всіх фізично реалізованих незалежних вимірювань похилих дальностей, сумарних дальностей та різниці відстаней.

Вторинні оглядові радіолокатори можуть бути віднесені до засобів незалежного спостереження лише умовно, оскільки координатна інформація у них дійсно визначається незалежно від бортових навігаційних систем, а додаткова польотна інформація (індивідуальний номер ПО, барометрична висота і в деяких режимах залишок палива, вектор дорожньої швидкості тощо) генерується бортовими технічними засобами, а тому для передачі відповідних повідомлень використовується літаковий відповідач, який виконує роль активного ретранслятора за лініями зв'язку “земля – борт” і “борт – земля”.

Загальними перевагами вторинних радіолокаторів у порівнянні з первинними, незалежно від класу та типу радіолокаторів, є:

- підвищена, порівняно з первинними радіолокаторами, інформаційна здатність, що дозволяє автоматично ідентифікувати об'єкти спостереження та здійснювати управління повітряного руху за чотирма координатами: похилою дальністю, азимутом, висотою та часом;

- велика інструментальна дальність дії за малих енергетичних витрат;

- малий рівень завад, що викликаються відбиттям сигналів від місцевих предметів та метеоутворень;

- малий рівень випромінюваної потужності.

При цьому слід зазначити, що загальними недоліками радіолокаційних систем спостереження, що ґрунтуються на використанні вторинних радіолокаторів, є:

- необхідність оснащення всіх ПО літаковими відповідачами;

- необхідність введення в апаратуру запитувачів та відповідачів систем подавлення сигналів бічних пелюсток діаграми спрямованості антени за запитом та відповіддю;

- високий рівень внутрісистемних завад;

- можливість несанкціонованого використання літакових відповідачів як для отримання інформації, так і для паралізації літакових відповідачів постановкою внутрісистемних завад потрібної інтенсивності.

У вторинних радіолокаторах роздільна здатність і точність за азимутом гірше, ніж у первинних радіолокаторів, бо принцип дії вторинного радіолокатора заснований на обробці пакету сигналів відповіді. Це призводить до значних труднощів при поділі сигналів та декодуванні сигналів відповідей відповідачів ПО, розташованих на близьких відстанях один щодо одного і приблизно на однакових пеленгах. Для підвищення азимутальної точності таких радіолокаторів за однієї і тієї ж ширини діаграми спрямованості антени необхідно збільшувати кількість імпульсів у пакеті, тобто, збільшувати частоту запитів, що автоматично призводить до значного збільшення внутрішньосистемних завад. Компромісним вирішенням цього протиріччя є використання моноімпульсного способу прийому та обробки повідомлень відповіді, а радикальним рішенням задачі – усунення внутрішньосистемних завад та збільшення інформаційної здатності за рахунок застосування моноімпульсних дискретно-адресних вторинних радіолокаторів, що працюють у режимі S.

Завдяки підвищеним, у порівнянні з первинними радіолокаторами, інформаційним можливостям, вторинні радіолокатори в даний час відносяться до основних засобів спостереження за повітряною обстановкою. Відповідно до концепції розвитку систем CNS/ATM вторинні радіолокатори і надалі залишатимуться основним засобом спостереження повітряного простору, але їх параметри зазнають значних змін.

Оцінка якості виміру координат повітряних об'єктів синхронною мережею кооперативних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору

Розглянемо можливість та доцільність кооперативної обробки координатної інформації в багатопозиційній системі спостереження повітряного простору при її організації на пункті обробки радіолокаційної інформації. Кооперативність прийому відбитих сигналів і випромі-

нованих сигналів відповіді полягає у тому, що приймальні позиції здатні приймати відбиті сигнали від ПО, опромінених будь-якою з передаючих позицій, що випромінюють сигнали [56, 74].

По суті потрібно знайти таку процедуру обробки координатної радіолокаційної інформації в системі з N радіолокаційних станцій, яка при реалізації кооперативної обробки дозволить підвищити точність вимірювань дальності з врахуванням спільної обробки всіх фізично реалізованих незалежних вимірювань похилих дальностей, сумарних дальностей та різниці відстаней. Реалізація зазначених процедур випромінювання та прийому при відповідному частотному розносі на позиціях незалежних приймально-підсилювальних трактів та каскадів гетеродинування дозволяє проводити вимірювання дальностей, їх сум та різниць відстаней незалежно [56, 74]. Так, при деякому розмірі бази

$$L = R\lambda / 4l_{po},$$

де R – відстань до ПО; l_{po} – найбільший розмір ПО, приймальні пункти приймають відбиті від ПО сигнали за різними пелюстками діаграми зворотного вторинного випромінювання. Ці сигнали незалежні та некорельовані.

Кооперативність обробки радіолокаційної інформації полягає в тому, що всі позиції зазначеної інформаційної системи здатні приймати відбиті сигнали від ПО у зоні відповідальності при їх опроміненні будь-якою передавальною позицією, а також і сигнали за даними каналу радіотехнічної розвідки, коли сам ПО є джерелом радіовипромінювання. Така процедура суттєво збільшує обсяг сигнальної та координатної інформації та дозволяє отримати надмірні виміри сумарних дальностей та різниць відстаней, у яких міститься інформація про похилі дальності до ПО. Під надмірністю розуміється вимірювання кількох однорідних фізичних величин (дальностей до ПО, сумарних дальностей та різниць відстаней), які пов'язані між собою яким-небудь законом, при якому шукане значення величини (дальності до ПО) отримують шляхом обробки результатів проміжних вимірювань за рівнянням надлишкових вимірювань з метою підвищення точності оцінювання.

Перехід до синхронної мережі радіолокаційних систем спостереження [56, 74] дозволяє здійснити кооперативне приймання сигналів та розподілену обробку радіолокаційної інформації. Одночасне вимірювання дальності до ПО, що спостерігається в мережі радіолокаційних систем спостереження, дозволяє вимірювати висоту польоту повітряного об'єкту, що значно покращує інформаційне забезпечення користувачів. При цьому слід зазначити, що геометрія інформаційної мережі при вимірі висоти польоту ПО, тобто геометричний фактор, має вплив на результуючу точність вимірювань. Розглянемо геометричний фактор при вимірі висоти польоту ПО за даними виміру похилої дальності.

Будемо розглядати синхронну мережу радіолокаційних систем, що складається з n приймальних пунктів. Для первинної системи спостереження це буде n наземних приймальних пунктів (приймальним пунктом), один із яких випромінюючий, а для вторинної системи спостереження – це $n-1$ наземних приймальних пунктів і один випромінюючий відповідач ПО. З викладеного видно, що обидві задачі ідентичні. На кожному приймальному пункті здійснюється обробка сигналів відповіді та передача отриманої інформації на пункт сумісної обробки даних, на якому, як правило, розміщується запитувач. Між пунктом обробки радіолокаційної інформації та кожним приймальним пунктом здійснюється обмін інформацією, у тому числі і для забезпечення їх синхронної роботи у єдиному системному часі мережі.

Для визначення просторового положення ПО використовуються сигнали відповіді літакового відповідача, які містять інформацію про індивідуальний адрес ПО.

Корисний сигнал відповіді літакового відповідача, який прийнято i -м приймальним пунктом, може бути представлено у наступному вигляді:

$$y_i(t, \vec{\lambda}) = U_i(t)q \left[t + \Delta t_i - \frac{r_{ci}(t)}{c} - t_b \right] \cos \left[\omega t + \left(\Delta \omega_b(t) - \frac{\omega}{c} \dot{r}_i(t) \right) t + \varphi_{0i}(t) \right],$$

де $U_i(t)$ – амплітуда сигналу на вході i -го приймального пункту; t_b – час формування сигналів відповіді; r_{ci} – сумарна псевдодальність; ω – несійна частота сигналу, що приймається; Δt_i – зсув шкали часу i -го приймального пункту відносно шкал часу мережі приймальних пунктів; $\Delta \omega_b(t)$ – зсув частоти сигналу за рахунок нестабільності частоти генератора літакового відповідача; $\frac{\omega}{c} \dot{r}_i(t)$ – доплерівська частота сигналів відповіді; $\dot{r}_i(t)$ – радіальна швидкість ПО відносно i -го приймального пункту; $\varphi_{0i}(t)$ – випадкова початкова фаза.

Слід зазначити, що неузгодженості шкал часу Δt_i можуть бути виміряні, тому їх можна розглядати як відомі величини.

Зсув частоти $\Delta \omega_b(t)$, який обумовлений нестабільністю генератора літакового відповідача, може бути описаний наступним диференціальним рівнянням:

$$\Delta \dot{\omega}_b(t) = -\gamma \Delta \omega_b(t) + \sqrt{2\gamma} \sigma_\omega n_\omega(t), \quad \Delta \omega_b(t) = \Delta \omega_{b,0},$$

де $n_\omega(t)$ – незалежний формуючий білий гаусівський шум з нульовим математичним очікуванням та одиничною інтенсивністю; γ – параметр, що характеризує ширину спектра флуктуацій частот генератора літакового відповідача; σ_ω^2 – дисперсія флуктуацій частоти генератора літакового відповідача.

Вектор параметрів радіосигналу, який безпосередньо визначає радіосигнал на вході i -го приймального пункту інформаційної системи, що розглядається, буде мати наступний вид:

$$\vec{\lambda} = \|r_{si}, \Delta \omega_i\|^T,$$

де $\Delta \omega_i = \Delta \omega_b - \frac{\omega}{c} \dot{r}_i$.

При цьому слід зазначити, що огинаюча сигналу літакового відповідача $q(t)$ буде являти собою модулюючу послідовність, сформовану на основі часового імпульсного кодування.

Сумарну псевдодальність r_{si} можна записати у наступному виді:

$$r_{si} = r_0 + r_i + \Delta r_0 + \delta r,$$

де r_0 – відстань між центральним пунктом та ПО в момент приймання сигналу запиту; r_i – відстань між i -м приймальним пунктом та ПО в момент приймання сигналу відповіді; Δr_0 – приріст відстані r_0 внаслідок руху ПО за час t_b ; δr – випадкові зміни псевдодальності, викликані нестабільністю затримки відповіді у літаковому відповідачі.

Зв'язок вимірюваних значень сумарної псевдодальності r_{si} з координатами ПО та приймальним пунктом у декартовій системі координат описується рівнянням виду

$$r_{si} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (z_0 - z)^2 + (h_0 - h)^2} + \sqrt{(x_i - x)^2 + (z_i - z)^2 + (h_i - h)^2} + \delta r,$$

де $x_0, z_0, h_0, x_i, z_i, h_i, x, z, h$ – координати пункту обробки інформації i -го приймального пункту та ПО відповідно. Слід зауважити, що у цьому виразі враховано, що величиною Δr_0 можна знехтувати внаслідок її малості.

Випадкові зміни псевдодальності, які викликані, як правило, нестабільністю затримки сигналів відповіді у літаковому відповідачу, можуть бути описані диференціальним рівнянням

$$\dot{\delta r}(t) = -\beta \delta r(t) + \sqrt{2\beta\sigma_{\delta r}} n_{\delta r}(t), \quad \delta r(t_0) = \delta r_0,$$

де $n_{\delta r}(t)$ – формуючий білий гаусівський шум із нульовим математичним очікуванням та одиничною інтенсивністю; β – характеризує ширину спектра флуктуацій процесу $\delta r(t)$; $\sigma_{\delta r}^2$ – стаціонарне значення дисперсії.

В подальшому будемо враховувати, що з ПО в момент часу $T_u(t)$ відбувається випромінювання сигналу відповіді ПО. Будемо враховувати, що є чотири наземні приймальні пункти. Отже, у кожному із приймальних пунктів у момент часу $T_i(t) (i=0, \dots, 3)$ здійснюється приймання сигналу літакового відповідача. Вважаючи шкали часу, формовані в пунктах системи, високо стабільними можна виключити залежність часових процесів від t . Час прибуття сигналу з літакового відповідача в кожний із приймальних пунктів інформаційної системи, що розглядається, можна записати у наступному виді:

$$T_i(t) = T_u(t) + R_i / c.$$

Віднімаючи час прибуття в базовий пункт обробки радіолокаційних інформації (будемо вважати його нульовим) від часу інших приймальних пунктів, можна записати:

$$R_i - R_0 = c(T_i - T_0) = r_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Виходячи з геометрії розташування приймальних і випромінюючого пунктів, можна записати наступний вираз:

$$R_0^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad R_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2. \quad (1)$$

Відповідно до виразу (1) можливо отримати наступну залежність:

$$R_i^2 - R_0^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2(x_i x + y_i y + z_i z). \quad (2)$$

Використовуючи вирази (1) та (2), можна записати наступний вираз:

$$R_i^2 - R_0^2 = (R_i - R_0)(R_i + R_0) = (r_i + 2R_0)r_i. \quad (3)$$

Коли підставимо вираз (3) у вираз (2) та здійснимо перестановку, отримаємо:

$$2(x_i x + y_i y + z_i z + r_i R_0) = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2. \quad (4)$$

У нашому випадку потрібно оцінити вплив похибок часової синхронізації рознесених пунктів приймання сигналів відповіді на якість вимірювання висоти польоту літакового відповідача, тобто координати z . При цьому окреме диференціювання виразу (4), з урахуванням $T_{i,j} = 0, 1, 2, 3$, дозволяє записати вираз

$$2 \left(x_i \frac{dx}{dT_j} + y_i \frac{dy}{dT_j} + z_i \frac{dz}{dT_j} + r_i \frac{dR_0}{dT_j} + R_0 \frac{dr_i}{dT_j} \right) = -2r_i \frac{dr_i}{dT_j}. \quad (5)$$

Використовуючи результати диференціювання виразу (5), можна записати:

$$\begin{pmatrix} x & y & z & -R_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & r_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & r_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & r_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} dx/dT_0 & dx/dT_1 & dx/dT_2 & dx/dT_3 \\ dy/dT_0 & dy/dT_1 & dy/dT_2 & dy/dT_3 \\ dz/dT_0 & dz/dT_1 & dz/dT_2 & dz/dT_3 \\ dR_0/dT_0 & dR_0/dT_1 & dR_0/dT_2 & dR_0/dT_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_1 & 0 & 0 \\ R_2 & 0 & -R_2 & 0 \\ R_3 & 0 & 0 & -R_3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Якщо отриманий вираз (6) записати у наступному вигляді $\vec{D}\vec{A} = \vec{R}$, то рішення виразу буде мати вид

$$\vec{A} = \vec{D}^{-1}\vec{R}. \quad (7)$$

Таким чином для обраного розташування приймальних пунктів синхронної мережі радіолокаційних систем спостережень та позиції ПО матриці \vec{D} і \vec{R} відомі, що дає можливість розв'язати вираз (7).

При цьому слід зазначити, що у виразі (7) третій ряд оціненої матриці \vec{A} являє собою ні що інше, як чутливість вимірювання висоти ПО до похибок як вимірів похилої дальності, так і синхронності формування шкал часу приймальних пунктів радіолокаційної системи, що розглядається. Якщо всі виміри похилої дальності та часові інтервали однаково чутливі до похибок формування синхронної мережі, то сума квадратичних похибок представляє собою загальне значення геометричного фактору.

Розрахунки чутливості вимірювання висоти, нормованої за швидкість світла, наведені на рис. 2, а та рис. 1, б. Розрахунки проводились для випадку фіксованої висоти повітряного об'єкту, яка дорівнювала $z = 5$ км, та трикутного розташування наземних приймальних пунктів у точках з координатами: для рис. 1, а – $(0; 50 \cdot 10^3)$, $(50 \cdot 10^3; -50 \cdot 10^3)$, $(-50 \cdot 10^3; -50 \cdot 10^3)$ та для рис. 2, б – $(0; 100 \cdot 103)$, $(100 \cdot 103; -100 \cdot 103)$, $(-100 \cdot 103; -100 \cdot 103)$.

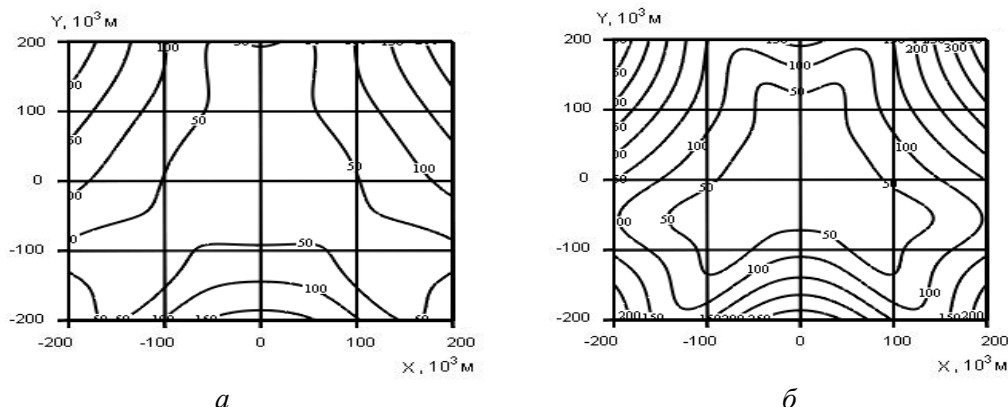


Рис. 2. Якість вимірювання висоти повітряного об'єкту

Використання наведеної методики дозволяє висувати вимоги щодо синхронності шкал часу в єдиній синхронній інформаційній мережі радіолокаційних систем спостереження при вимірюванні координат ПО.

Введення додаткових приймальних позицій у багатопозиційну радіолокаційну систему, що розглядається, або збільшення кількості вимірюваних сум відстаней (або різниць відстаней) також покращує точність визначення координат ПО.

Однак слід зазначити, що платою за покращення точності визначення координат ПО є ускладнення системи за рахунок:

- збільшення кількості приймальних позицій;
- збільшення кількості приймально-передаючих трактів;
- необхідність синхронізації процесів випромінювання, прийому сигналів та керування режимами огляду;
- ускладнення алгоритмів ототожнення ПО.

З наведених розрахунків можливо зробити висновок, що чутливість вимірювання висоти ПО суттєво залежить від геометрії розташування приймальних пунктів синхронної мережі радіолокаційних систем спостереження. При збільшенні відстані між пунктами прийому – зростає площа, що охоплена кривими рівної чутливості.

Для визначення необхідної точності синхронізації шкал часу приймальних пунктів при вимірюванні координат ПО потрібно враховувати, що сумарна похибка виміру похилої дальності визначається наступним чином:

$$\sigma_{ds} = \sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_{ch}^2},$$

де σ_{ch}^2 – дисперсія похибки синхронності формування шкал часу приймальних пунктів синхронної мережі, перерахована у дальність; σ_d^2 – дисперсія похибки виміру похилої дальності, яка визначається як $\sigma_d^2 = \left(\frac{c\tau_s}{q}\right)^2$, де τ_s – тривалість сигналів, які використовуються у синхронній мережі; q – відношення сигнал/шум на приймальному пункті.

Показано, що при використанні рівної ваги у складі точності виміру дальності, а отже і у вимірі висоти польоту повітряного об'єкту точність синхронності шкал часу приймальних пунктів складає величини, що досягаються сучасними засобами синхронізації часу.

Висновки

Показано, що кооперативні системи спостереження повітряного простору в складі незалежних некооперативних, незалежних кооперативних та залежних кооперативних систем відіграють значну роль в інформаційному забезпеченні системи контролю використання повітряного простору і управління повітряного руху.

Використання наведеної методики оцінки якості виміру координат повітряних об'єктів синхронною мережею кооперативних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору дозволяє висувати вимоги щодо синхронності шкал часу в єдиній синхронній інформаційній мережі радіолокаційних систем спостереження при вимірюванні координат повітряних об'єктів.

Показано, що платою за покращення точності визначення координат повітряних об'єктів синхронною мережею кооперативних радіолокаційних систем є ускладнення системи за рахунок збільшення позицій, збільшення кількості приймально-передавальних трактів, необхідності синхронізації процесів випромінювання, прийому сигналів та керування режимами огляду.

Список літератури:

1. D. Xue, L.-T. Hsu, C.-L. Wu, C.-H. Lee, and K. K. H. Ng. Cooperative Surveillance Systems and digital-technology enabler for a real-time standard terminal arrival schedule displacement // *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 50. P. 101402, 2021. doi:10.1016/j.aei.2021.101402.
2. Обод І., Свид І., Мальцев О. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навч. посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
3. Обод І. І., Старокожев С. В., Свид І. В. Оптимізація виявлення сигналів запиту в кооперативних системах спостереження // VIII Міжн. наук.-пр. конф. «Обробка сигналів і негаусівських процесів», присвяч. пам'яті проф. Ю.П. Кунченка : тези доповідей. Черкаси : ЧДТУ, 2021. 117–119.
4. Обод І.І., Стрельницький О.О. Захист інформації в мережі систем спостереження повітряного простору // *Системи обробки інформації*. 2016. № 2(139). С. 47–49.
5. Svyd I. et al. Noise immunity of data transfer channels in Cooperative Observation Systems: Comparative Analysis // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2018. doi:10.1109/infocommst.2018.8632019.
6. Pleninger S. The testing of MLAT method application by means of usage low-cost ADS-B receivers // *MAD – Magazine of Aviation Development*. 2014. Vol. 2, no. 7. P. 8. doi:10.14311/mad.2014.07.02.
7. Lo S. C. and Enge P. Capacity Study of Multilateration (MLAT) based navigation for alternative position navigation and timing (APNT) services for Aviation // *Navigation*. 2012. Vol. 59, no. 4. P. 263–279. doi:10.1002/navi.25.

8. Garcia M. A., Mueller R., Innis E., and B. Veysman. An enhanced altitude correction technique for improvement of WAM position accuracy // 2012 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2012. doi:10.1109/icensurv.2012.6218375.
9. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2015. № 9(134). С. 96–98.
10. Atkinson S. GPS synchronization of WAM systems – pros and cons [Electronic resource] / Simon Atkinson, Chris Heyes: paper for International Symposium on Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications (ESAVS 2010), 16-18 March 2010. Berlin, 2010.
11. Stefanski J. Asynchronous wide area multilateration system // Aerospace Science and Technology. 2014. Vol. 36. P. 94–102. doi: 10.1016/j.ast.2014.03.016.
12. D. He, X. Lu, W. Wang and J. Su. Analysis of Wide Area Multilateration Localization Accuracy Under Different Stations Layout and Aircraft Height // DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017. doi: 10.12783/dtetr/iceta2016/7068.
13. J. Gao, J. Zou, and N. Guo. A secondary surveillance radar data analysis technique based on geometrical method // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2020. Vol. 517. P. 707–715.
14. J. Ye, R. Shi, F. Liang, Y. Li, and H. Lin. Research and simulation analysis on research on secondary radar signal coverage // IAEAC 2021 – IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. 2021. P. 2308–2311.
15. Pleninger S. Relationship between the transponder triggering area and the SSR Mode S surveillance coverage map // New Trends in Civil Aviation. 2022-October. P. 81–85.
16. Muntean G., Pastrav A., and Palade T. Monopulse secondary surveillance radar – environment impact on target detection // 2022 International Workshop on Antenna Technology, iWAT 2022. P. 86–89.
17. Stevens. Brian L., Frank L. Lewis, and Eric N. Johnson. Aircraft control and simulation: dynamics, controls design, and autonomous systems. John Wiley & Sons, 2015.
18. Svyd I. et al. Comparative quality analysis of the air objects detection by the Secondary Surveillance Radar // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2019. doi:10.1109/elnano.2019.8783539.
19. Kim E. and Sivits K. Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance // Aerospace Science and Technology. 2005. Vol. 45. P. 203–208.
20. Strohmeier M. Large-scale analysis of aircraft transponder data // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2017. Vol. 32, no. 1. P. 42–44. doi:10.1109/maes.2017.160149.
21. Leonardi M. and Fausto D. D. Secondary surveillance radar transponders classification by RF Fingerprinting // 2018 19th International Radar Symposium (IRS), 2018. doi:10.23919/irs.2018.8448244.
22. David S. and Vitolo A. J. Airborne IFF transponder antenna system with Omni and steerable cardioid patterns, Aug. 1970. P. 279–283.
23. 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.
24. 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.
25. Svyd I., Obod I., Maltsev O., Tkachova T., and Zavolodko G. Optimal request signals detection in cooperative surveillance systems // 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2019. doi:10.1109/ukrcon.2019.8879840.
26. I. Obod 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.
27. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Порівняльний аналіз двох методів обробки сигналів відповіді запитальних систем спостереження // Системи обробки інформації. 2014. № 1(117). С. 41–43.
28. S. Ramasamy R. Sabatini and Gardi A. Cooperative and Non-Cooperative Sense-and-Avoid in the CNS+A Context: A Unified Methodology // Proceedings of IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS 2016). Washington DC (USA), June 2016. Print ISBN: 978-1-4673-9333-1.
29. A. del Corte-Valiente and J. M. Gomez-Pulido. Identification of aircraft in a non-cooperative surveillance system. the case study of aircraft type Canadair Regional Jet // Advances in Automation and Robotics Research in Latin America. 2017. P. 245–254. doi:10.1007/978-3-319-54377-2_21.
30. I. Svyd 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.
31. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Синтез та аналіз оптимальних виявлювачів сигналів запиту в літакових відповідачах запитальних систем спостереження повітряного простору // Зб. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2014. № 4(41). С. 8–11.
32. G. Jiang, Y. Fan, and H. Yuan. Assessing the capacity of Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar System // 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), 2019. doi:10.1109/csqrwc.2019.8799146.

- 33.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), 2019. doi:10.1109/ukrcon.2019.8879812.
- 34.Mahipathi A. C., Gunnery S., Srihari P., D’Souza J., and Jena P. Constrained Radar waveform optimization for a cooperative radar-communication system // Physical Communication. 2023. Vol. 57, p. 101984. doi:10.1016/j.phycom.2022.101984.
- 35.Obod I. et al. Assessing SSR relative data capacity // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021. doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575971
- 36.Edstaller S. and Mueller D. A cooperative radar system with active reference target synchronization for kinematic target analysis // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021. Vol. 69, no. 9. P. 4118–4131. doi:10.1109/tmtt.2021.3079236.
- 37.Obod I., Svyd I., Maltsev O., and B. Bakumenko. Comparative analysis of noise immunity systems identification friend or foe // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2020. doi:10.1109/elnano50318.2020.9088856.
- 38.Strelnytskyi O. et al. Assessment reliability of data in the identification friend or foe Systems // 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2019. doi:10.1109/elnano.2019.8783397.
- 39.Svyd I. et al. Method of increasing the identification friend or foe Systems Information Security // 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2019. doi:10.1109/aiact.2019.8847853.
- 40.Svyd I., Obod I., Maltsev O., Shtykh I., and G. Zavolodko. 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), 2019. doi:10.1109/cadsm.2019.8779322.
- 41.Otsuyama T., Honda J., 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), 2018. doi:10.1109/isemc.2018.8394048.
- 42.Svyd I. et al. Fusion of Airspace Surveillance Systems Data // 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2019. doi:10.1109/aiact.2019.8847916
- 43.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), 2020. doi:10.1109/dessert50317.2020.9125040.
- 44.Semenets V., Svyd I., Obod I., Maltsev O., and Tkach M. Quality Assessment of measuring the coordinates of airborne objects with a secondary surveillance radar // Data-Centric Business and Applications. 2021. P. 105–125, doi:10.1007/978-3-030-71892-3_5.
- 45.Обод І.І., Свид І.В.. Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об’єктів запитальними системами спостереження // Системи обробки інформації. 2010. Вип. 9 (90). Харків : ХУПС, 2010. С. 74–76.
- 46.Obod I. et al. Fusion the coordinate data of airborne objects in the networks of Surveillance Radar Observation Systems // Data-Centric Business and Applications, 2020. P. 731–746, doi:10.1007/978-3-030-43070-2_31.
- 47.Bliss D. W. Cooperative radar and communications signaling: The estimation and information theory odd couple // 2014 IEEE Radar Conference, 2014. doi:10.1109/radar.2014.6875553.
- 48.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.
- 49.Обод І.І., Стрельницький О.О., Буланій О.А. Просторовий метод підвищення пропускної здатності телекомунікаційних мереж // Системи обробки інформації. 2014. № 9(125). С. 140–142.
- 50.Обод І.І.,Стрельницький О.О.,Свид І.В.,Семенова Є.Ю. Аналіз інформаційних процесів обміну даними у системі контролю повітряного простору // Системи озброєння і військова техніка. 2016. № 3(47). С. 88–90.
- 51.. Черних П., Обод І.І., Свид І.В. Інформаційне забезпечення на основі мереж спостереження повітряного простору // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2011. 2/9(50). С. 23–25. doi: 10.15587/1729-4061.2011.1850.
- 52.Shevtsov I. et al. A Method for Increasing the Capacity of Radio Systems of Short-Range Navigation // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022. P. 629–633. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037138.
- 53.Starokozhev S. et al. Frequency Efficiency Evaluation of Query Airspace Surveillance Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 501–505. doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772190.
- 54.Starokozhev S. et al. Optimization of the Probability of Transmission of Flight Data in the Response Channel of Secondary Radar Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 511–515. doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772199.
- 55.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.
- 56.Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору : монографія. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 224 с.

57. Jiang Y., Yang Z., Bo C., and Zhang D. Continuous IFF response signal recognition technology based on capsule network // Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, 2021, P. 455–468. doi: 10.1007/978-3-030-90196-7_39.
58. Обод І.І., Шевцова В.В. Відносна пропускна спроможність запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // Системи обробки інформації. 2013. № 2(109). С. 74–76.
59. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2015. № 9(134). С. 96–98.
60. I. Svyd et al. Analysis of the impact of interference on the time position of signals in requesting Airspace Observation Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2021. doi:10.1109/picst54195.2021.9772138.
61. Shevtsov I. et al. Quality Evaluation of flight data transmission by the response channel of Secondary Radar // 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2022. doi:10.1109/picst57299.2022.10238528.
62. Starokozhev S. et al. Comparative analysis of methods for processing data transmission information codes by secondary radar channels // 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2022. doi:10.1109/picst57299.2022.10238651.
63. Starokozhev S., Shevtsov I., Datsenko O., Chumak V., and Sierikov A. Signal provision of address systems identification friend or foe // 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2022. doi:10.1109/picst57299.2022.10238675.
64. Бакуменко Б.В., Обод І.І. Методи підвищення завадозахищеності запитувальних радіотехнічних систем // Системи обробки інформації. 2006. № 9(58). С. 10–12.
65. Свид І.В. та інш. Порівняльний аналіз методів визначення координат повітряних об'єктів системами широкозонавої мультилатерації // Радіотехніка. 2022. Вип. 209, С. 162–177. doi: 10.30837/rt.2022.2.209.16.
66. Обод І.І., Яценко І.Л., Можяєв О.О. Оцінка інформаційної ємності мобільних інформаційних мереж // Системи обробки інформації. 2014. № 5(121). С. 136–138.
67. Свид І.В. Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об'єктів вторинними радіолокаційними системами // Радіотехніка. 2023. Вип. 213. С. 78–87. doi: 10.30837/rt.2023.2.213.09.
68. Andrusevich 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>
69. Свид І.В. Показники якості інформаційного забезпечення користувачів сполученими системами спостереження повітряного простору // Радіотехніка. 2011. Вип. 165. С. 157–160.
70. Черних О.П., Обод І.І., Охрименко М.Ю. Розподілена обробка інформації у сполучених мережах систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2011. № 2(92). С. 180–182.
71. Обод І.І., Шевцова В.В. Методи підвищення швидкості передачі запитальних систем передачі інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 4(111). С. 23–26.
72. 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.
73. Обод І.І., Шевцова В.В. Пропускна спроможність відповідачів запитальних систем передачі польотної інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 1(108). С. 105–108.
74. Свид І. В., Обод І. І. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий»: монографія. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 254 с.

Надійшла до редколегії 26.08.2023

Відомості про авторів:

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

Обод Іван Іванович – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; email: ivan.obod@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9898-0937>

Дацько Сергій Валерійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; email: serhii.datsko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2524-8702>

Головатенко Сергій Валерійович – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Україна; email: serhii.holovatenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7169-6899>