

*І.В. СВІД, канд. техн. наук, В.В. СЕМЕНЕЦЬ, д-р техн. наук,
О.С. МАЛЬЦЕВ, М.Г. ТКАЧ, С.В. СТАРОКОЖЕВ, О.О. ДАЦЕНКО, І.О. ШЕВЦОВ*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ СИСТЕМАМИ ШИРОКОЗОНОВОЇ МУЛЬТИЛАТЕРАЦІЇ

Вступ

Основним джерелом даних про повітряну обстановку в системі контролю повітряного простору є системи радіолокаційного спостереження (СРЛС). Системи радіолокаційного спостереження забезпечують незалежне спостереження та визначають місце розташування повітряного об'єкта (ПО) за допомогою засобів наземного базування. Прикладом незалежного спостереження є первинні оглядові радіолокатори (ПОРЛ) [1 – 3], вторинні оглядові радіолокатори (ВОРЛ) [2 – 6], системи ідентифікації за ознакою «свій-чужий» (ІСЧ) (Identification Friend or Foe) (IFF) [7 – 9], а також багатопозиційні радіолокатори (БПРЛ). Багатопозиційні радіолокатори, залежно від джерела отримання сигнальних даних, можуть базуватися як на первинному, так і на вторинному оглядових радіолокаторах. БПРЛ, що базується на базі ПОРЛ [10 – 13], має передавач, що випромінює зондувальний сигнал, а ехо-сигнали приймають приймальні (невипромінюючі) пункти, які рознесені на деяку відстань. В даний час широкого поширення набувають БПРЛ, що базуються на принципі Multiple-input multiple-output (МІМО) [14 – 16] технології. Використання сигналів запиту (СЗ) літакових відповідей вторинної радіолокації (ВРЛ) та ІСЧ систем дозволяє створювати багатопозиційні системи радіолокаційного спостереження, які отримали назву MLAT [16 – 18] або WAM [19 – 23]. При цьому слід зазначити, що є можливість визначення координат ПО при випромінюванні сигналу запиту як своїм запитувачем, так і при випромінюванні сигналів запиту іншими запитувачами, що входять в мережу систем ВОРЛ.

БПРЛ, що базуються на базі ВОРЛ (ІСЧ), залежно від площі територіального обслуговування поділяються на Multilateration (MLAT) [16 – 18] та Wide Area Multilateration (WAM) [18, 20 – 23].

В даний час спостерігається тенденція поєднання MLAT у «широко зоніві» (Wide Area Multilateration) інтегровані системи [21 – 24]. Одна з головних переваг пасивної локації, що характерно для MLAT і WAM – можливість виявляти навіть такі цілі, що важко помічаються, як літаки, обладнані покриттями, що поглинають зондуючі сигнали, і засобами протирадарного маскування.

При залежному кооперативному спостереженні розташування визначається на борту ПО. Ці інформаційні дані передаються підсистемі локального спостереження поряд з можливими додатковими даними, використовуючи як свої засоби передачі інформації, так і супутникові канали передачі інформації. Прикладом залежного спостереження є концепція залежного автоматичного спостереження (Automatic dependent surveillance – ADS) [25-29]. ADS – концепція, заснована на наявності двосторонніх ліній передачі даних "повітря-земля", за якими інформаційні дані про ПО, включаючи місцезнаходження, час та інші дані автоматично передається на землю відповідному споживачеві.

Виходячи з наведеного, можна зробити висновок, що всі системи кооперативного спостереження являють системи передачі даних за принципом запит-відповідь [30 – 34]. Справді, вони містять канал передачі сигналів запиту і канал передачі сигналів відповіді. Для кодування інформації в цих системах застосовуються примітивні інтервально-часові та позиційні коди [35 – 39], що суттєво знижує інформаційну ємність каналів передачі даних, що розглядаються [40 – 45].

Принципи та методи реалізації багатопозиційного спостереження повітряного простору у системі контролю повітряного простору

Багатопозиційні радіолокаційні системи [12, 13, 46 – 51] широко застосовуються для оцінки розташування об'єктів у просторі і стали серйозними конкурентами традиційних радіолокаційних систем огляду повітряного простору. Залежно від масштабу завдань системи мультилатерації діляться на локальні, за якими закріпилася назва MLAT-систем, і глобальні, які називаються WAM-системами.

У системах MLAT розташування ПО визначається на основі оцінки відстаней об'єкта до довільного числа опорних радіонавігаційних точок, в яких розміщені приймачі, здатні приймати сигнали, що випромінюються літаковим відповідачем ВОРЛ. Слід розрізняти активний та пасивний режими роботи систем БПРЛ. В активному режимі запит на борт надсилається передавачем самої системи в одному з форматів A/C/S вторинної радіолокації. У пасивному режимі запит на борт надходить від стороннього джерела, яким може бути один із ВОРЛ. У цьому випадку, оскільки джерело сигналу запиту ніяк не синхронізовано з системою, приймачі опорних радіонавігаційних точок здійснюють прослуховування ефіру, виявлення сигналу відповіді з борту та вимірювання псевдодальностей, подібно супутниковим навігаційним системам. Можна стверджувати, що MLAT – це технологія, що дозволяє визначити розташування літаків або інших транспортних засобів без використання спеціального, додаткового обладнання, передаючи при цьому мінімальний обсяг даних [17, 18]. Процес визначення розташування ПО заснований на різниці в часі приходу сигналу, випромінюваного об'єктом (ПО) у напрямку приймальних станцій системи MLAT (TDOA – Time Difference of Arrival – різниця у часі приходу). Система MLAT служить альтернативою класичним станціям радіолокації, так як вирішує завдання перекриття великої території за допомогою приймальних станцій, які можна розташувати на місцевості та нарощувати їх кількість. Крім цього, система адаптується в місцях зі складним рельєфом, за рахунок низьких витрат на її встановлення та обслуговування. Інформаційні дані про координати ПО оновлюються кожну секунду, що підвищує ситуаційну поінформованість диспетчерів, а це у свою чергу підвищує безпеку польотів, пропускну здатність та ефективність.

При цьому слід зазначити, що система MLAT забезпечує високу точність визначення місця розташування ПО і має таку перевагу, як відсутність "мертвих" зон, які притаманні класичним станціям радіолокації.

Однак при реалізації системи MLAT необхідно враховувати такі фактори:

- конфігурація (розташування приймальних станцій та їх кількість) впливає на точність позиціонування ПО;
- розміщення приймальних станцій повинно здійснюватися з урахуванням можливості забезпечення електроживленням і технічним обслуговуванням.

Приймальні станції багатопозиційної системи спостереження приймають сигнали відповідачів ПО, декодують їх і передають на сервер-концентратор повідомлення, що містять декодовану відповідь і час отримання сигналу. Щоб визначити місцезнаходження ПО необхідно зафіксувати час отримання сигналу кожної станції. Для визначення моменту надходження сигналу на приймаючі станції, системі потрібен єдиний опорний час. Зазвичай це досягається одним із двох способів:

1) всі отримані сигнали направляються на центральну обробну станцію для отримання часової позначки за загальним годинником. У цьому випадку система повинна обчислити час проходження повідомлення між кожною приймальною станцією та центральною станцією та внести відповідні корективи. Система передає повідомлення між центральною та приймальними станціями для контролю та коригування часу проходження;

2) годинники на всіх приймачах синхронізують за загальним опорним часом, зокрема, за глобальними навігаційними супутниковими системами GNSS (Global Navigation Satellite Systems), або з використанням передавача у відомому місці [52 – 54]. Відстань між таким передавачем і станціями, що приймають, відома, так що за допомогою відстеження часу

надходження сигналів від цього передавача на кожну приймальну станцію можна вносити корективи з метою підтримки синхронізації годинників приймачів.

Завдання визначення розташування об'єкта на площині або в просторі полягає у обчисленні геометричних величин, що характеризують його розташування. До цих величин відносяться довжина шляху поширення радіохвиль від об'єкта або дальність та напрямок на цей ПО. Для визначення координат використовується, як правило, різницево-далекомірний метод. Координати визначаються за різницям моментів приходу сигналу в рознесені приймальні пункти. У цьому випадку визначення місця розташування ПО можна здійснювати за сукупністю наявних вимірів.

У загальному випадку визначення параметрів траєкторного руху ПО здійснюється при вирішенні рівнянь, що описують дальність, які можна представити в наступному виді:

$$R_i = c\tau_i(t) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad (1)$$

де D_i – геометрична дальність від приймального пункту до ПО; x, y, z – координати розташування ПО; $\tau_i(t) = t_{i+1} - t_i$ – тривалість часового інтервалу між моментами часу t_{i+1} та t_i (час затримки сигналу); c – швидкість поширення радіохвиль.

Як правило, вимірне значення дальності (1) містить помилку вимірювання, що дозволяє D_i подати наступним чином:

$$D_i = D_{ist,i} + \Delta D_i,$$

де $D_{ist,i}$ – справжнє значення дальності ПО до i -го приймального пункту; ΔD_i – помилка виміру дальності, яку можна надати наступним виразом:

$$\Delta D_i = \Delta D_{sinh,i} + \Delta D_{sl,i} + \Delta D_{trop,i}, \quad (2)$$

де $\Delta D_{sinh,i}$ – систематична похибка, обумовлена нестабільністю бортового еталону часу та частоти; $\Delta D_{sl,i}$ – випадкова складова помилки виміру дальності; $\Delta D_{trop,i}$ – похибка, обумовлена рефракцією в тропосфері.

Похибку вимірювання (2) можна представити в наступному виді:

$$\Delta D_i = \Delta D_{post,i} + \Delta D_{fl,i}; \quad \Delta \dot{D}_{post,i} = 0; \quad \Delta \dot{D}_{fl,i} = -\frac{1}{\tau_{D_i}} \Delta D_{fl,i} + \frac{1}{\tau_{D_i}} w_{D_i},$$

де $\Delta D_{post,i}$ – постійна складова похибки; $\Delta D_{fl,i}$ – флуктуаційна складова похибки; τ_{D_i} – час кореляції; w_{D_i} – формуючий білий гаусівський шум з відомими характеристиками.

У багатопозиційній системі спостереження (рис. 1) вимірюються незалежні значення $\tau_{01}, \tau_{02}, \tau_{03}$ різниці часу поширення сигналів від ПО до центрального (опорного) пункту через рознесені пункти прийому (RP1, RP2, RP3).

Для визначення розташування ПО необхідно обчислити дві координати x_{ao}, y_{ao} . Вихідними даними для обчислення координат ПО є координати периферійних станцій x_i, y_i і різниця дальностей ΔD на незалежних базах d_{01}, d_{02}, d_{03} :

$$\Delta D_{1,2} = \sqrt{(x_2 - x_{vo})^2 - (y_2 - y_{vo})^2} - \sqrt{(x_1 - x_{vo})^2 - (y_1 - y_{vo})^2}.$$

Координати периферійних станцій отримуємо за допомогою карти, а саме: геодезичні довготи L і широти B .

Геодезичні координати переводяться з геодезичної в прямокутну декартову геоцентричну систему координат:

$$\begin{vmatrix} x \\ y \\ z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} (N+h)\cos B \cos L & 0 & 0 \\ 0 & (N+h)\cos B \sin L & 0 \\ 0 & 0 & (N+h)-e^2 N \sin^2 B \end{vmatrix},$$

де x, y, z – координати станції у прямокутній геоцентричній системі координат; h – висота над поверхнею еліпсоїда; $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$ – ексцентриситет земного еліпсоїда; $N = a(1 - e^2 \sin^2 B)^{-1/2}$ – радіус кривизни першого вертикалу; $a = 6378136$ м, $b = 6356777$ м.

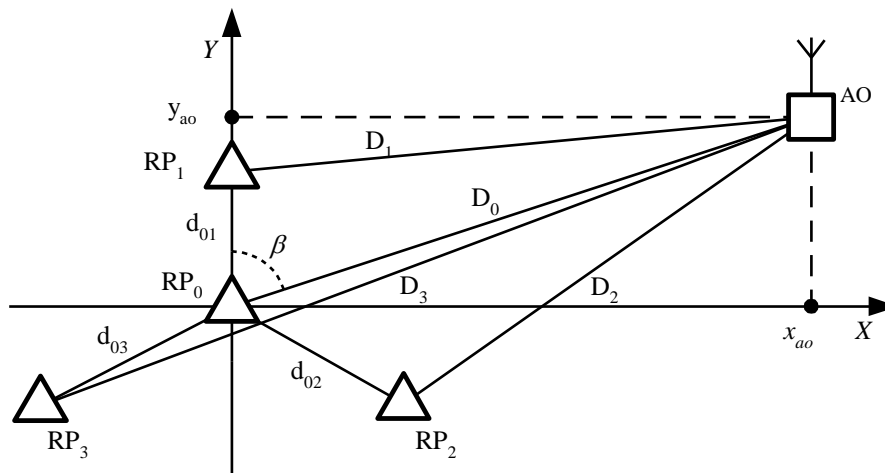


Рис. 1. Конфігурація різницево-далекомірної системи

Завдяки цим розрахункам отримуємо прямокутні координати для оцінки просторового розташування станцій. Вони використовуються для визначення розташування об'єктів у межах поля аеродрому, інші вирішують завдання навігації ПО у галузі простору, що має протяжність у сотні кілометрів на поверхні Землі та десятки кілометрів над цією поверхнею.

Одним із завдань при створенні систем мультilaterації є синтез алгоритмів оцінки розташування ПО у двовимірному (MLAT-системи) або тривимірному (WAM-системи) просторі. Прийнято виділяти три класи методів оцінки розташування у багатопозиційних системах: статистичні, чисельні та алгебраїчні. Статистичні методи враховують випадковий характер оцінок параметрів сигналів і припускають синтез оцінок розташування на основі методу максимальної правдоподібності. Ці методи найбільш близькі до оптимальних, проте вони не дозволяють отримати пряме рішення і вимагають застосування оптимального пошуку екстремуму досить складної цільової функції у просторі, розмірність якого дорівнює кількості координат об'єкта. Чисельні методи також використовують методи оптимального пошуку розв'язання деякої оптимізаційної задачі, проте на відміну від статистичних методів пошук проходить у просторі меншої розмірності при простій цільовій функції. Оцінки, одержувані цими методами, у загальному випадку є зміщеними та неоптимальними у статистичному сенсі. Алгебраїчні методи не враховують імовірнісний характер даних, проте вони є прямими, оскільки дозволяють отримати оцінки координат ПО рішенням деякої лінійної системи рівнянь. Останнє робить зазначені методи особливо привабливими для практичного застосування, незважаючи на те, що методи цієї категорії не можуть претендувати на оптимальність. Таким чином, алгоритм оцінки розташування ПО в системах MLAT повинен бути комбінацією алгоритмів, що належать зазначеним категоріям, що дозволить поєднувати високу точність і обчислювальну ефективність.

Показники якості оцінки точності розташування повітряних об'єктів системами багатопозиційного спостереження повітряного простору

Системи багатопозиційного спостереження повітряного простору складаються з кількох розподілених наземних приймальних станцій та їх точність оцінки координат повітряних об'єктів істотно залежить від геометричного розподілу приймальних станцій (Geometrical Dilution of Precision) (GDOP) та від закону зміни висоти (Horizontal Dilution of Precision) (HDOP). Можна стверджувати, що MLAT та WAM – це метод локалізації гіперболи або гіперболоїду. В цьому випадку точність оцінки координат повітряних об'єктів пов'язана з помилкою вимірювання різниці часу запізнення (TDOA [22, 54]), а також геометричного розташування приймальних пунктів багатопозиційної системи і може бути оцінена так:

$$\sigma_s = \sigma_T G,$$

де σ_s – точність позиціонування системи MLAT; σ_T – точність вимірювання TDOA [22, 54]; G – геометричний розподіл приймальних станцій GDOP [54].

GDOP визначає схему розташування станції і впливає на точність позиціонування всієї багатопозиційної системи. Саме ця обставина вказує на те, що спосіб зменшення значення GDOP дуже важливий для контролю точності всієї багатопозиційної системи. Він визначає набір рівнянь для вимірювання різниці у часі прибуття сигналів на рознесені приймальні пункти багатопозиційної системи. Якщо припустити, що $\vec{x} = \begin{bmatrix} r_x & r_y & r_z \end{bmatrix}^T$ – вектор просторового розташування ПО, $\vec{x}_i = \begin{bmatrix} r_{xi} & r_{yi} & r_{zi} \end{bmatrix}^T$ – вектор положення i -ї наземної приймальної станції багатопозиційної системи, в якій є N приймальних станцій. У цьому випадку для N приймальних станцій матрична форма сформована за допомогою набору вищенаведених співвідношень для вимірювання часу набуває виду

$$\vec{T}_m = \vec{T}_0 + \frac{\vec{r}}{c} + \vec{n}, \quad (3)$$

де c – швидкість поширення сигналу; \vec{T}_m – виміряне значення часу, протягом якого сигнал досягне приймальної станції; \vec{T}_0 – час передачі сигналу повітряним об'єктом; \vec{r} – відстань від повітряного об'єкта до приймальної станції; \vec{n} – шум виміру.

Якщо припустити, що середнє значення шумів вимірювання дорівнює нулю і вони не залежать один від одного, то матриця коваріаційного виразу (3) набуває виду

$$\vec{P}_n = E[\vec{n} \cdot \vec{n}^T].$$

У аналізованих багатопозиційних системах, зазвичай, використовується алгоритм різниці у часі прибуття (TDOA) для гіперболічної локалізації. Отже для того, щоб у виразі (3) виключити загальний параметр T_0 , розглянемо різницю в часі для набору рівнянь:

$$T_{m(i-1)} - T_{mi} = \frac{(r_{i-1} - r_i)}{c} + (n_{i-1} - n_i),$$

де i знаходиться в діапазоні $2 \dots N$. Це відповідає $(N-1)$ формулам різниці в часі прибуття сигналів на приймальні пункти багатопозиційної системи, що розглядається.

Використовуючи векторну матрицю для виразу значень різниці шуму виміру в багатопозиційній системі, що розглядається, можна записати:

$$\begin{pmatrix} n_1 - n_2 \\ n_1 - n_2 \\ \cdot \\ n_1 - n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \cdot \\ n_N \end{pmatrix} = \bar{H}\bar{n}.$$

У цьому випадку коваріаційна матриця різниці в часі прибуття сигналів на приймальні пункти може бути визначена з виразу

$$\bar{P}_\Delta = E \left\| (\bar{H}\bar{n})(\bar{H}\bar{n})^T \right\| = \bar{H}P_n\bar{H}^T.$$

За допомогою методу найменших квадратів, а також методу лінійної оцінки вимірювання та локалізація різниці в часі коваріаційної матриці отримуємо співвідношення

$$\bar{P}_x = E \left\| (\hat{x} - x)(\hat{x} - x)^T \right\| = c^2 \left\| F^T T^T (\bar{H}P_n\bar{H}^T)^{-1} YF \right\|^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{r_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{r_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{r_z}^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де σ_{r_x} , σ_{r_y} , σ_{r_z} – стандартні відхилення помилок вимірювання у напрямках координат x , y и z .

Одиничний вектор опорної точки x_0 до приймальної станції записується у такому виді:

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} \frac{r_{x0} - r_{x1}}{r_{01}} & \frac{r_{y0} - r_{y1}}{r_{01}} & \frac{r_{z0} - r_{z1}}{r_{01}} \\ \frac{r_{x0} - r_{x2}}{r_{02}} & \frac{r_{y0} - r_{y2}}{r_{02}} & \frac{r_{z0} - r_{z2}}{r_{02}} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{r_{x0} - r_{xN}}{r_{0N}} & \frac{r_{y0} - r_{yN}}{r_{0N}} & \frac{r_{z0} - r_{zN}}{r_{0N}} \end{pmatrix}.$$

У цьому випадку використовуючи вираз (4) і визначення GDOP отримуємо наступний вираз для оцінки GDOP:

$$G = \sqrt{\sigma_{r_x}^2 + \sigma_{r_y}^2 + \sigma_{r_z}^2}. \quad (5)$$

Відповідно похибки визначення горизонтального та вертикального положення описуються за допомогою HDOP та VDOP у вигляді виразів (6) та (7) відповідно

$$H = \sqrt{\sigma_{r_x}^2 + \sigma_{r_y}^2}, \quad (6)$$

$$V = \sqrt{\sigma_{r_z}^2}, \quad (7)$$

де H представляє HDOP; V представляє VDOP.

Слід зазначити, що для ширококутових маршрутів та зони терміналу HDOP контролює точність горизонтальної локалізації, а VDOP – вертикальну точність локалізації. Чим більше значення HDOP та VDOP, тим нижче буде точність локалізації повітряного об'єкта.

Порівняльний аналіз якості вирішення координатного завдання системами широкозонового багатопозиційного спостереження

Як правило, відомі системи широкозонового багатопозиційного спостереження для оцінки координат повітряних об'єктів використовують різницево-далекомірний метод. Однак реалізація систем WAM дозволяє використовувати інші методи оцінки розташування повітряних об'єктів, що випромінюють сигнали відповіді за каналом вторинної радіолокації. Розрізняють три основні способи визначення координат об'єктів, що випромінюють у зазначеному радіодіапазоні: кутомірний, різницево-далекомірний, кутомірно-різницево-далекомірний, кутомірно-сумарно-далекомірний.

При кутомірному методі встановлюється тільки напрямок ПО за допомогою двох (або більше) приймальних пунктів, рознесених на відстань b . Для визначення координат ПО у тривимірному просторі необхідно вимірювати не менше трьох кутів координат. У двох пунктах слід виміряти два азимути та один кут місця або два кути місця та один азимут.

Нехай виміряні два азимути та один кут місця (рис. 2).

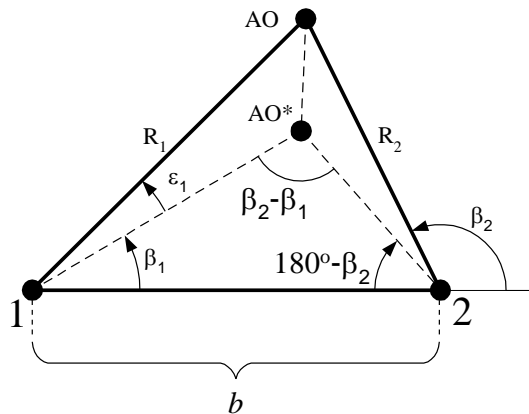


Рис. 2. Визначення похилої дальності за двома азимутами та одним кутом місця

В даному випадку можна показати, що

$$R_1 = \frac{b \sin \beta_2}{\cos \varepsilon_1 \cdot \sin(\beta_2 - \beta_1)}; \quad R_2 = \sqrt{b^2 + R_1^2 - 2bR_1 \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1}.$$

Якщо виміряні два кути місця і один азимут. В цьому випадку маємо:

$$R_2 = R_1 \frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon_2} \cdot R_1^2 \left(\frac{\sin^2 \varepsilon_1}{\sin^2 \varepsilon_2} - 1 \right) + 2R_1 b \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 - b^2 = 0, \quad (8)$$

З (8) знаходимо

$$R_1 = \frac{-b \cos \varepsilon_1 \cos \beta_1 + b \sqrt{\cos^2 \varepsilon_1 \cos^2 \beta_1 + \left(\frac{\sin^2 \varepsilon_1}{\sin^2 \varepsilon_2} - 1 \right)}}{\frac{\sin^2 \varepsilon_1}{\sin^2 \varepsilon_2} - 1}.$$

Кутомірно-різницево-далекомірний метод поєднує в собі кутомірний і різницево-далекомірний методи. Він полягає у визначенні напрямків та різниці відстаней від радіо-

випромінюючого об'єкта до пункту радіотехнічної системи. При цьому треба мати щонайменше два приймальних пункти (рис. 3).

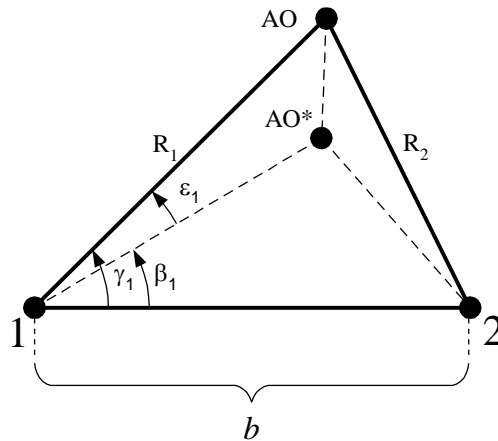


Рис. 3. Кутомірно-різничево-далекомірний метод визначення похилих дальностей

Наступні формули дозволяють обчислити похилі дальності кутомірно-різничево-далекомірним методом при різних визначеннях різниці відстаней від ПО до приймального пункту:

$$R_1 = \frac{b^2 - \Delta R_2^2}{2(b \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \beta_1 + \Delta R_2)}, \quad R_2 = \frac{b^2 + \Delta R_2^2 + 2b \Delta R_2 \cos \gamma_1}{2(b \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \beta_1 + \Delta R_2)};$$

або

$$R_1 = \frac{b^2 - \Delta R_2^2}{2(b \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \beta_1 - \Delta R_1)}, \quad R_2 = \frac{b^2 + \Delta R_1^2 - 2b \Delta R_1 \cos \gamma_1}{2(b \cos \varepsilon_1 \cdot \cos \beta_1 - \Delta R_1)};$$

де $R_2 = R_1 + \Delta R_2$ або $R_2 = R_1 + \Delta R_1$.

Представлені методи оцінки координат ПО, що випромінюють сигнали відповіді каналами вторинної радіолокації, відносяться до основних.

Проведемо порівняльний аналіз розглянутих вище методів розв'язання координатного завдання системою WAM. Для проведення порівняльної оцінки різних методів вирішення завдання інформаційного забезпечення розглядатимемо наступний вектор стану ПО:

$$\vec{W} = \|x \quad y\|^T.$$

Крім того, будемо вважати, що похибка оцінки точності місцеположення ПО, що входить до нього, має нульове середнє значення і наступну матрицю коваріацій вимірювань оцінюваних координат ПО:

$$\vec{P} = \left\| \begin{array}{cc} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y^2 \end{array} \right\|^T. \quad (9)$$

Точність вирішення координатного завдання аналізованими методами будемо характеризувати площею еліпсів похибок оцінювання вектора стану \vec{W} , яка визначається як корінь квадратний з детермінанта матриці коваріації, що в загальному випадку еквівалентна HDOP:

$$S = \sqrt{\det \vec{P}} = \sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2 - \sigma_{xy}^2}.$$

Для порівняння точнісних характеристик різних методів вирішення координатної задачі будемо обчислювати квадратні корні з детермінантів коваріаційних матриць, що відображають площу еліпсів похибок, тобто:

$$\mu = P_2 / P_1. \quad (10)$$

З урахуванням (9) вираз (10) можна записати як

$$\mu = \sqrt{\frac{(\sigma_{x_2}^2 \sigma_{y_2}^2 - \sigma_{x_2 y_2}^2)}{(\sigma_{x_1}^2 \sigma_{y_1}^2 - \sigma_{x_1 y_1}^2)}}. \quad (11)$$

Отримаємо вирази для коваріаційних матриць розглянутих вище методів розв'язання задачі інформаційного забезпечення системами WAM.

Для кутомірного методу вектор спостережуваних параметрів $\vec{\alpha} = \|\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3\|^T$ включає три азимути ПО із рознесених пунктів прийому системи WAM. Перерахунок кутових похибок у похибки положення дає такі результати:

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = (1 - \rho_{xy}^2) H_{1i}, \quad \frac{1}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2) H_{2i}, \quad \rho_{xy} = - \left(\frac{\sum_{i=1}^3 \frac{(x-x_i)(y-y_i)}{r_i^4 \sigma_{\beta_i}^2}}{\sqrt{H_{1i} H_{2i}}} \right). \quad (12)$$

де $H_{1i} = \sum_{i=1}^3 \frac{(y-y_i)^2}{r_i^4 \sigma_{\beta_i}^2}$; $H_{2i} = \sum_{i=1}^3 \frac{(x-x_i)^2}{r_i^4 \sigma_{\beta_i}^2}$; $r_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}$.

На рис. 4, на підставі обчислень виразів (12), представлено лінії рівної площі еліпсів похибок за результатами рівноточної пеленгації з трьох пунктів прийому, розташованих на одній прямій, рівній дальності від центрального пункту прийому. Наведені розрахунки показують, що похибки оцінки координат збільшуються з віддаленням ПО від бази та від нормалі до бази.

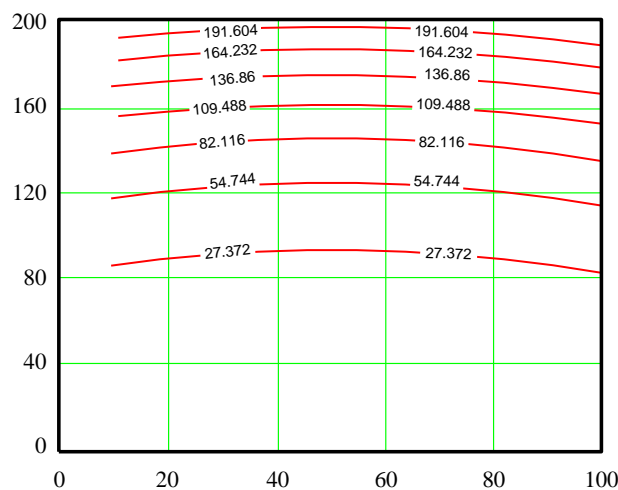


Рис. 4. Оцінка точності кутомірного методу

Фізично низька точність кутомірного методу пояснюється низькою точністю вимірювання кутових координат, а швидке зростання похибок при віддаленні від лінії бази – збільшенням похибок визначення площинних координат при віддаленні від прийомального пункту при постійній точності вимірювання кутових координат.

Для кутомірно-далекомірного методу оцінки координат ПО вектор спостережуваних параметрів $\vec{\alpha} = \|r \ \beta\|^T$ характеризує дві полярні координати, що визначаються за пунктом прийому системи WAM, а вектор стану – дві декартові координати на площині $\vec{W} = \|x \ y\|^T$. Припустимо, що вимірювання параметрів вектора параметрів, що спостерігаються, здійснюються з нульовим середнім значенням і дисперсіями вимірюваних параметрів σ_r^2 та σ_β^2 . Також будемо вважати, що похибки вимірювань дальності r та β азимуту малі відносно дійсних значень вимірюваних величин.

При зазначених припущеннях похибки вимірювання координат повітряних об'єктів мають нульові середні значення, а вираз, що визначає еліпс помилок, можна записати як

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = (1 - \rho_{xy}^2) \left[\frac{x^2}{r^2 \sigma_r^2} + \frac{y^2}{r^4 \sigma_\beta^2} \right], \quad \frac{1}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2) \left[\frac{x^2}{r^4 \sigma_\beta^2} + \frac{y^2}{r^2 \sigma_r^2} \right], \quad \rho_{xy} = - \frac{xy \left(\frac{1}{\sigma_r^2} - \frac{1}{r^2 \sigma_\beta^2} \right)}{\sqrt{H_3 H_4}}, \quad (13)$$

$$\text{де } H_3 = \frac{x^2}{\sigma_r^2} + \frac{y^2}{r^2 \sigma_\beta^2}; \quad H_4 = \frac{x^2}{r^2 \sigma_\beta^2} + \frac{y^2}{\sigma_r^2}.$$

На рис. 5, на підставі обчислень за виразом (13), представлено лінії рівної площі еліпсів помилок за результатами кутомірно-далекомірних вимірів. Представлені розрахунки показують значне поліпшення точності вимірювання координат ПО при використанні кутомірно-далекомірного методу.

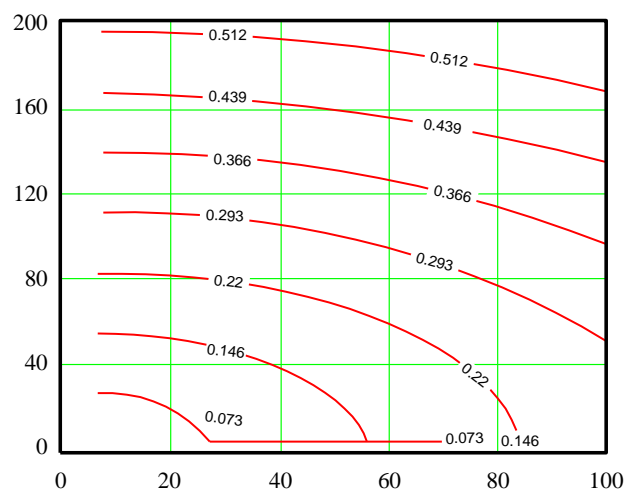


Рис. 5. Оцінка точності кутомірно-далекомірного методу

На рис. 6 представлено порівняльні показники якості вимірювання координат кутомірним та кутомірно-далекомірним методами.

Результати розрахунків (рис. 6) показують, що використання активних систем WAM дозволяє реалізувати вимірювання координат ПО на одному приймальному пункті та підвищити точність вимірювання координат в десятки-сотні разів.

До недоліків кутомірно-далекомірного методу відноситься низька енергетична прихованість, що обумовлена просторовим поєднанням запитувача ВОРЛ та приймального пункту. Для збереження енергетичної скритності ВОРЛ переходять до кутомірно-сумарно-далекомірного методу.

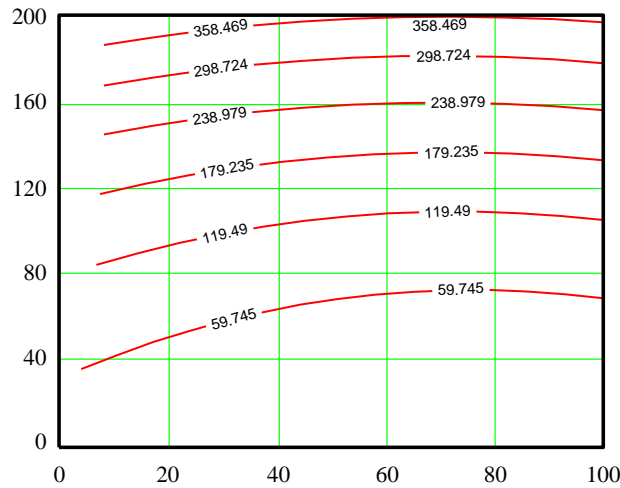


Рис. 6. Порівняльна оцінка точності кутомірного та кутомірно-далекомірного методу

В кутомірно-сумарно-далекомірному методі наземний запитувач рознесений на відстань бази b із приймальним пунктом, що дозволяє зберегти основну перевагу системи – енергетичну скритність. Координатна задача вирішується на приймальному пункті системи WAM за однією з двох множин параметрів, що вимірюються: (ρ, Θ_r) або (ρ, Θ_T) , де $\rho = R_r + R_T$ – сумарна відстань за маршрутом запитувач-ПО-приймальний пункт, R_r – відстань від запитувача до ПО, R_T – відстань від ПО до приймального пункту, Θ_r, Θ_T – азимут ПО, виміряний відповідно на пунктах випромінювання та прийому системи WAM. Таким чином, рознесення запитувача та приймального пункту виключає демаскування системи WAM та розширює кількість множин первинних вимірювань. Зазначимо, що реалізація кутомірно-сумарно-далекомірного методу обчислення координат ПО можлива завдяки використанню несанкціонованого запиту літакового відповідача (ЛВ).

Розрахуємо точність вимірювання площинних декартових координат ПО при використанні першої та другої множин первинних вимірювань у припущенні фіксованих похибок вимірювань. Припустимо, що результати вимірів полярних координат ρ, Θ_r, Θ_T спотворені білим гаусовим шумом з нульовими середніми значеннями σ_r^2 та дисперсіями $\sigma_{\Theta_r}^2$ ($\sigma_{\Theta_T}^2$). Вважатимемо, що похибки вимірювань ρ та Θ_r (Θ_T) малі відносно їхніх істинних значень.

При використанні першої множини вимірювань (ρ, Θ_r) полярні координати ρ та Θ_r виміряні WAM, перераховуються в координати прямокутної системи X та Y за наступними виразами:

$$X = \frac{\rho^2 \cos \Theta_r + \rho b}{2(b \cos \Theta_r + \rho)}, \quad Y = \frac{(\rho^2 + b^2) \sin \Theta_r}{b \cos \Theta_r + \rho}.$$

При зазначених припущеннях похибки вимірювання декартових координат X та Y мають нульові середні значення, а їх дисперсії і коваріація становлять:

$$\sigma_x^2 = \frac{(H_1^2 \sigma_r^2 + H_2^2 \sigma_{\Theta}^2)}{H_3^4}, \quad \sigma_y^2 = \frac{(H_4^2 \sigma_r^2 + H_5^2 \sigma_{\Theta}^2)}{H_3^4}, \quad \sigma_{xy}^2 = \frac{(H_1 H_4 \sigma_r^2 + H_2 H_5 \sigma_{\Theta}^2)}{H_3^4},$$

де $H_1 = 2\rho b \cos^2 \Theta_r + (\rho^2 + b^2) \cos \Theta_r$, $H_2 = (b^2 - \rho^2) \rho \sin \Theta_r$, $H_3 = 2(b \cos \Theta_r + b)$,

$$H_4 = \rho^2 \sin 2\Theta_r + (\rho^2 + b^2) \cos \Theta_r, \quad H_5 = (\rho^2 + b^2)(\rho \cos \Theta_r + b).$$

При використанні другої множини вимірювань (ρ, Θ_T) декартові координати ПО X та Y розраховуються на підставі виразів:

$$X = \frac{b/2 - 0.5\rho \cos \Theta_T}{(b/\rho \cos \Theta_T - 1)}, \quad Y = \frac{(b^2/2\rho) \sin \Theta_T}{b/\rho \cos \Theta_T - 1}. \quad (14)$$

Якщо припустити, що похибки визначення декартових координат ПО за виразами (14) мають нульові середні значення, тоді їх дисперсії та коваріації становлять:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \frac{b \cos \Theta_T}{2} - b\rho \cos^2 \Theta_T + \left(\frac{\rho^2 \cos \Theta_T}{2} \right)^2 \sigma_r^2 + \frac{b^2}{2} \rho \sin \Theta_T \\ &\quad - \left(\frac{\rho^2 \cos \Theta_T}{2} \right)^2 \sigma_\Theta^2 \frac{1}{(b \cos \Theta_T - \rho)^4}; \\ \sigma_y^2 &= \frac{\rho^2 \sin \Theta_T}{2} - \frac{b\rho^2 \sin \Theta_T}{2} + \left(\frac{\rho^2 \cos \Theta_T}{2} \right)^2 \sigma_r^2 + \frac{b^2}{2} \rho \sin \Theta_T - \\ &\quad - \left(\frac{\rho^2 \cos \Theta_T}{2} \right)^2 \sigma_\Theta^2 \frac{1}{(b \cos \Theta_T - \rho)^4}; \\ \sigma_{xy} &= \left\{ \left[\left(\frac{b^2 \cos \Theta_T}{2} - b\rho \cos^2 \Theta_T + \frac{\rho^2 \cos \Theta_T}{2} \right) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \left(\frac{\rho^2 \sin \Theta_T}{2} - \frac{b\rho \sin 2\Theta_T}{2} + \frac{b^2 \sin \Theta_T}{2} \right) \right] \sigma_r^2 + \left[\left(\frac{b^2 \rho \sin \Theta_T}{2} - \frac{\rho^3 \sin \Theta_T}{2} \right) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left(\frac{b^3}{2} - \frac{b}{2} \right) \rho^2 + \left(\frac{\rho^3}{2} - \frac{b^2}{2} \right) \rho \cos \Theta_T \right] \sigma_\Theta^2 \right\} \\ &\quad \times \frac{1}{(b \cos \Theta_T - \rho)^4}. \end{aligned}$$

Для реалізації кутомірно-сумарно-далекомірного методу на приймальному пункті системи WAM необхідно знати момент випромінювання сигналів запиту, що істотно ускладнює технічну реалізацію системи WAM. Однак наявність засобів формування та передачі синхросигналів дозволяє в даний час створити синхронну мережу з ВОРЛ і приймальних пунктів системи WAM. Таким чином, можна стверджувати, що аналізована структура системи WAM найбільш ефективна, оскільки дозволяє реалізувати досить високу точність вимірювання координат ПО за рахунок несанкціонованого використання ЛВ і реалізувати енергетично приховану систему WAM. Реалізувати переваги високої точності вимірювання координат ПО за рахунок несанкціонованого використання ЛВ та необхідності створення синхронної мережі можливо за рахунок кутомірно-різницево-далекомірного методу оцінки координат ПО.

В кутомірно-різницево-далекомірному методі система WAM включає два приймальні пункти, рознесені на відстань бази b , та винесений запитувач, який може не входити до складу системи WAM. Запитувач ВОРЛ випромінює сигнали запиту без імпульсу подавлення бічних пелюсток через слабоспрямовану антенну систему та забезпечує несанкціонований запит літакового відповідача у всьому просторі вирішення координатної задачі системою

WAM. Вектор вимірюваних параметрів включає один азимут ПО та різницю відстаней $\Delta r = r - r_1$ від літакового відповідача до приймальних пунктів. Тому кутотірно-різничево-далекомірній системі WAM не потрібно знати ні просторових координат запитувача, ні моменту випромінювання сигналів запиту.

Припустимо, що результати вимірювань азимуту та різниці відстаней спотворені білим гаусовим шумом з нульовими середніми значеннями та дисперсіями σ_β^2 та $\sigma_{\Delta r}^2$. Вважати-мемо, що похибки вимірювань β та Δr малі відносно їхніх істинних значень.

При зазначених припущеннях похибки визначення декартових координат ПО мають нульові середні значення, а еліпс помилок можна визначити з формул:

$$\frac{1}{\sigma_x^2} = (1 - \rho_{xy}^2) \left[\frac{1}{\sigma_{\Delta r}^2} \left(\frac{b}{r_1} - \frac{x\Delta r}{rr_i} \right)^2 + \frac{y^2}{r^4 \sigma_\beta^2} \right], \quad \frac{1}{\sigma_y^2} = (1 - \rho_{xy}^2) \left[\frac{1}{\sigma_{\Delta r}^2} \left(\frac{y\Delta r}{rr_i} \right)^2 + \frac{x^2}{r^4 \sigma_\beta^2} \right],$$

$$\rho_{xy} = \frac{\frac{1}{\sigma_{\Delta r}^2} \left(\frac{b}{r_1} - \frac{x\Delta r}{rr_i} \right) \frac{y\Delta r}{rr_i} + \frac{xy}{r^4 \sigma_\beta^2}}{\sqrt{\left[\frac{1}{\sigma_{\Delta r}^2} \left(\frac{b}{r_1} - \frac{x\Delta r}{rr_i} \right)^2 + \frac{y^2}{r^4 \sigma_\beta^2} \right] \left[\frac{1}{\sigma_{\Delta r}^2} \left(\frac{y\Delta r}{rr_i} \right)^2 + \frac{x^2}{r^4 \sigma_\beta^2} \right]}}.$$

Лінії рівної площі еліпсів похибок за результатами кутотірно-різничево-далекомірному вимірі, розраховані на підставі згаданих виразів, наведено на рис. 7.

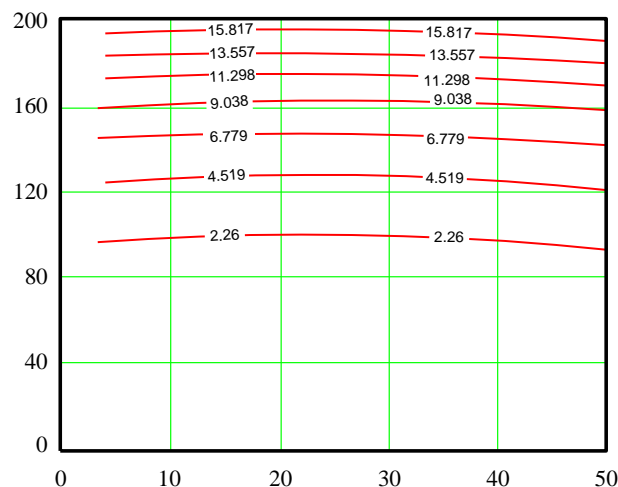


Рис. 7. Точність кутотірно-різничево-далекомірного методу

З рис. 7 видно, що кутотірно-різничево-далекомірний метод WAM забезпечує вирішення координатної задачі з прийнятною точністю, що в п'ять-десять разів вище, ніж кутотірний метод. Крім того, виключення запитувача зі складу системи WAM дозволяє одночасно зберегти енергетичну скритність системи WAM при відносно нескладній технічній реалізації. Аналогічні результати можна отримати з аналізу точності інших методів вирішення координатної задачі системами WAM із несанкціонованим запитом літакового відповідача. Таким чином, літаковий відповідач ВОРЛ є доступним джерелом інформації для виявлення ПО та визначення їх координат системами WAM зацікавленою стороною. Для цього можуть використовуватися наявні повністю пасивні системи WAM.

Висновки

Можливості систем WAM значно зростають при використанні принципів побудови ВОРЛ, як несинхронної мережі, та літакового відповідача, як відкритої одноканальної системи масового обслуговування з обслуговуванням першого, правильно прийнятого сигналу запиту. Несанкціонований запит літакового відповідача дозволяє перейти від повністю пасивних методів виявлення та визначення координат повітряного об'єкта до активно-пасивних, що забезпечують збільшення точності розв'язання координатного завдання у десятки-сотні разів зі збереженням енергетичної скритності системи WAM. Отримані результати, з одного боку, свідчать про необхідність застосування в сучасних системах WAM несанкціонованого запиту літакового відповідача ВОРЛ, а з іншого – показують повну відсутність енергетичної скритності існуючих ВОРЛ.

За результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

- використання активних систем WAM значно розширює кількість методів розв'язання задач інформаційного забезпечення споживачів системи контролю повітряного простору;
- несанкціоноване використання літакових відповідачів ВОРЛ дозволяє визначити оцінку координат повітряного об'єкта як однопозиційним, так і багатопозиційним методами;
- порівняльний аналіз методів вирішення координатної задачі оцінки розташування повітряного об'єкта показав, що точність оцінки координат повітряного об'єкта в системі WAM, що розглядається, значно вище точності вимірювання координат в існуючих системах WAM.

Список літератури:

1. A. Koutny and M. Pelant, "Multi-channel degarbling method for SSR replies", 2017 18th International Radar Symposium (IRS), 2017. doi: 10.23919/irs.2017.8008171.
2. M. Abdalla, M. Barbary, M. Amin and M. El-Ghonami, "Design and Implementation of Proposed Low-Cost Dual-Channel IF Receiver for SSR", 2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG), 2020. doi: 10.1109/iceeng45378.2020.9171699.
3. X. Du, K. Liao and X. Shen, "Secondary Radar Signal Processing Based on Deep Residual Separable Neural Network", 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 2020. doi: 10.1109/icpics50287.2020.9202372.
4. 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.
5. V. Andrusevich and I. Obod, "Assessment of the Quality of Information Support by Air Radar Surveillance Systems", *Advanced Information Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 78-82, 2021. Available: 10.20998/2522-9052.2021.2.10.
6. I. Obod, "Integrated Coordinate-and-Time Support for the Address Inquiry in the Secondary Radar Systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, vol. 53, no. 3, pp. 54-56, 1999. doi: 10.1615/telecomradeng.v53.i3.100.
7. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, I. Shtykh, G. Maistrenko and G. Zavalodko, "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.
8. Á. Jarama, J. López-Araquistain, G. Miguel and J. Besada, "Complete Systematic Error Model of SSR for Sensor Registration in ATC Surveillance Networks", *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2171, 2017. doi: 10.3390/s17102171.
9. O. Peker and D. Akdur, "A Method for Elimination of False IFF Target Reports by Using ISLS and RSLs Techniques", 2019 Signal Processing Symposium (SPSymo), 2019. doi: 10.1109/sps.2019.8881951.
10. L. Bowden, "The story of IFF (Identification Friend or Foe)", *IEE Proceedings A Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, Reviews*, vol. 132, no. 6, p. 435, 1985. doi: 10.1049/ip-a-1.1985.0079.
11. E. El-Badawy, W. EL-Masry, M. Mokhtar and A. Hafez, "A secured chaos encrypted mode-S aircraft identification friend or foe (IFF) system", 2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems, 2010. doi: 10.1109/icspcs.2010.5709756.
12. І. Свид, І. Обод. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий». Харків : Друкарня Мадрид, 2021, с. 253. doi: 10/30837/978-617-7988-76-1.
13. І. Обод, І. Свид, О. Мальцев. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навчальний посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
14. Q. He, N. Lehmann, R. Blum and A. Haimovich, "MIMO Radar Moving Target Detection in Homogeneous Clutter", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 3, pp. 1290-1301, 2010. doi: 10.1109/taes.2010.5545189.
15. Q. He and R. Blum, "Diversity Gain for MIMO Neyman–Pearson Signal Detection", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 3, pp. 869-881, 2011. doi: 10.1109/tsp.2010.2094611.

16. J. Liu, J. Han, Z. Zhang and J. Li, "Target detection exploiting covariance matrix structures in MIMO radar", *Signal Processing*, vol. 154, pp. 174-181, 2019. doi: 10.1016/j.sigpro.2018.07.013.
17. S. Pleninger, "The Testing of MLAT Method Application by means of Usage low-cost ADS-B Receivers", *MAD – Magazine of Aviation Development*, vol. 2, no. 7, p. 8, 2014. doi: 10.14311/mad.2014.07.02.
18. S. Lo and P. Enge, "Capacity Study of Multilateration (MLAT) based Navigation for Alternative Position Navigation and Timing (APNT) Services for Aviation", *Navigation*, vol. 59, no. 4, pp. 263-279, 2012. doi: 10.1002/navi.25.
19. M. Garcia, R. Mueller, E. Innis and B. Veytsman, "An enhanced altitude correction technique for improvement of WAM position accuracy", 2012 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2012. doi: 10.1109/icsurv.2012.6218375.
20. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev, G. Zavolodko and S. Leonov, "WAM Systems: Comparative Analysis of Information Support Quality", 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020. doi: 10.1109/picst51311.2020.9468085.
21. J. Stefanski, "Asynchronous wide area multilateration system", *Aerospace Science and Technology*, vol. 36, pp. 94-102, 2014. doi: 10.1016/j.ast.2014.03.016.
22. 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*, no., 2017. doi: 10.12783/dtetr/iceta2016/7068.
23. M. Leeson, Error Analysis for a Wide Area Multilateration System, Qinet-iQ/C&IS/ADC/520896/7/19, 2006.
24. G. de Miguel Vela, J. B. Portas and J. G. Herrero, "Correction of propagation errors in Wide Area Multilateration systems," 2009 European Radar Conference (EuRAD), 2009, pp. 81-84.
25. J. Florez Zuluaga, J. Vargas Bonilla, J. Ortega Pabon and C. Suarez Rios, "Radar Error Calculation and Correction System Based on ADS-B and Business Intelligent Tools", 2018 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST), 2018. doi: 10.1109/ccst.2018.8585728.
26. B. Syd Ali, W. Ochieng, A. Majumdar, W. Schuster and T. Kian Chiew, "ADS-B System Failure Modes and Models", *Journal of Navigation*, vol. 67, no. 6, pp. 995-1017, 2014. doi: 10.1017/s037346331400037x.
27. S. Ramasamy, R. Sabatini and A. Gardi, "Cooperative and non-cooperative sense-and-avoid in the CNS+A context: A unified methodology", 2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2016. doi: 10.1109/icuas.2016.7502676.
28. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev and A. Hlushchenko, "Secondary Surveillance Radar Response Channel Information Security Improvement Method", 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), 2020. doi: 10.1109/dessert50317.2020.9125018.
29. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev, O. Vorgul, G. Maistrenko and G. Zavolodko, "Optimization of the Quality of Information Support for Consumers of Cooperative Surveillance Systems", *Data-Centric Business and Applications*, pp. 133-155, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43070-2_8.
30. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev, G. Maistrenko, O. Zubkov and G. Zavolodko, "Bandwidth Assessment of Cooperative Surveillance Systems", 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2019. doi: 10.1109/aict.2019.8847742.
31. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev, O. Vorgul, G. Maistrenko and G. Zavolodko, "Optimization of Data Transfer in Cooperative Surveillance Systems", 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2018. doi: 10.1109/infocommst.2018.8632134.
32. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, T. Okachova and G. Zavolodko, "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.
33. J. Kumar, S. Christopher and R. Bhattacharjee, "Target detection with transmitters identity waveform for multi-dynamic radar scenario", 2017 IEEE Calcutta Conference (CALCON), 2017. doi: 10.1109/calcon.2017.8280730.
34. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, I. Vorgul and I. Shevtsov, "Method for Increasing the Interference Immunity of the Channel for Measuring of the Short-Range Navigation Radio System", 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2022. doi: 10.1109/tcset55632.2022.9767069.
35. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, V. Chumak and A. Sierikov, "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.
36. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, V. Chumak and B. Bakumenko, "Estimation of the Spatial Coordinates of Air Objects in Synchronous Radar Networks for Airspace Observation", 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), 2021. doi: 10.1109/picst54195.2021.9772227.
37. G. Benelli, D. Giulii, E. Mese and S. Pardini, "Characterization of ATC environment for performance evaluation of modern SSR systems", 29th IEEE Vehicular Technology Conference, 1979. doi: 10.1109/vtc.1979.1622720.
38. Мальяренко А.С. Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением и государственного радиолокационного опознавания [Справочник], ХУПС, 2007, 78 с.
39. І.І. Обод, В.В. Шевцова. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // Збірник наук. праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2013. № 1(34). С. 123-125.

40. І.І. Обод, В.В. Шевцова. Відносна пропускна спроможність запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // Системи обробки інформації. 2013. № 2(109). С. 74-76.
41. V. Zhurnov, S. Solonskaya, and I. Shubin, "Evaluation of radar image processing efficiency based on intelligent analysis of processes", RT, vol. 4, no. 207, pp. 83–88, 2021. doi: 10.30837/rt.2021.4.207.09.
42. Обод І.І. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. Москва : ЦИИТ, 1998. 118 с.
43. І.І. Обод, В.В. Шевцова. Пропускна спроможність відповідачів запитальних систем передачі польотної інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 1(108). С. 105-108.
44. І.І. Обод. Управление потоками сигналов в несинхронных сетях запросных систем вторичной локации // Радиоэлектроника и информатика. 1998. № 2. С. 4-5.
45. І.І. Обод. Сравнительная оценка помехоустойчивости несинхронных и синхронных сетей запросных систем вторичной локации // Вестник ХГПУ. 1998. № 15. С. 58-61.
46. І.І. Обод, В.В. Глушенко, І.В. Коваль. Методи підвищення помехоустойчивости самолетных ответчиков запросных систем вторичной локации // Вестник ХГПУ. 1999. № 34. С. 84-86.
47. І.І. Обод. Повышение эффективности систем управления воздушного движения за счет реализации разнесенных систем вторичной радиолокации // Радиоэлектроника и информатика. 1997. Вып. 1. С. 63-64.
48. Б.В. Бакуменко, І.І. Обод. Методи підвищення завадозахищеності запитувальних радіотехнічних систем // Системи обробки інформації. 2006. № 9(58). С. 10-12.
49. І.І. Обод, О.О. Стрельницький, В.А. Андрусевич. Структура та показники якості обробки інформації систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2013. № 8 (115). С. 80-83.
50. M. K. Abdul-Hussein, O. Strelnytskyi, I. Obod, I. Svyd and H. Alrikabi, "Evaluation of the Interference's Impact of Cooperative Surveillance Systems Signals Processing for Healthcare", International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE), vol. 18, no. 03, pp. 43-59, 2022. doi: 10.3991/ijoe.v18i03.28015
51. М. Ткач, «Оцінка відносної пропускної здатності літакових відповідачів вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору», Радіотехніка, № 207, 2021, С. 123-131.
52. W.C. Young; Ming-Ten Tsai; Li-Min Chuang. Air traffic control system management. Proceedings of the IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow (Cat. No.00CH37093). doi: 10.1109/NAECON.2000.894952.
53. Jiang Chaoshu; Liu Changzhong; Wang Xuegang. GPS synchronized wide area multilateration system. 2009 International Conference on Communications, Circuits and Systems. DOI: 10.1109/ICCCAS.2009.5250465
54. Y. Sun, F. Zhang and Q. Wan, "Wireless sensor network-based localization method using TDOA measurements in MPR", IEEE Sensors J., vol. 19, no. 10, pp. 3741-3750, Jan. 2019.

Надійшла до редколегії 30.05.2022

Відомості про авторів:

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

Семенець Валерій Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: valery.semenets@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-2143>

Мальцев Олександр Сергійович – старший науковий співробітник кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: aleksandr.maltsev@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1520-9280>

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>

Старокожев Святослав Валерійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: sviatoslav.starokozhev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1600-1337>

Даценко Олександр Олександрович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: oleksandr.datsenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6685-0070>

Шевцов Іван Олександрович – асистент кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: ivan.shevtsov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0597-1589>