

УДК 621.396.96

Д.А. Гриб, Г.С. Залевський

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРАХУНОК РЕЗУЛЬТУЮЧОЇ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ЦІЛІ ПРИ ОБ'ЄДНАННІ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ВІД ДЕКІЛЬКОХ ДЖЕРЕЛ З УРАХУВАННЯМ ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЦІЛІ

Пропонується метод оцінювання результуючої точності вимірювання координат цілі при об'єднанні радіолокаційної інформації (РЛІ) від декількох джерел. Оцінювання точності вимірювання здійснюється з урахуванням систем координат, що використовуються, тактико-технічних характеристик (ТТХ) радіолокаційних станцій (РЛС) та їх змін у межах зон видимості. Метод також дозволяє врахувати характеристики вторинного випромінювання об'єктів локації у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль. В статті демонструються результати розрахунків точності вимірювання координат винищувача F-16 і крилатої ракети (КР) AGM86C при об'єднанні інформації РЛС метрового і сантиметрового діапазонів.

**Ключові слова:** автоматизована система управління, вторинне випромінювання, об'єднання радіолокаційної інформації, потенційна точність вимірювання, споживачі радіолокаційної інформації.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Третинна обробка РЛІ, яка передбачає оцінку координат і параметрів руху цілей на основі даних сукупності територіально рознесених джерел РЛІ (засобів радіолокації) з урахуванням передісторії їх роботи, дозволяє підвищити якість і достовірність радіолокаційного забезпечення споживачів (зенітні ракетні війська (ЗРВ), винищувальна авіація (ВА), підрозділи радіоелектронної боротьби (РЕБ)). Вимоги щодо швидкості видачі інформації про цілі призводять до такого територіального розміщення джерел РЛІ, при якому забезпечується перекриття їх зон видимості по всім типам і висотам цілей. Реалізація третинної (мультирадарної) обробки пов'язана із жорсткими вимогами до точності топоприв'язки і орієнтування окремих джерел РЛІ та до їх часової синхронізації. Сумісне використання інформації можливе як на етапі первинної (оцінка координат і параметрів руху цілей окремими засобами при одноразовому огляді простору), так і вторинної обробки (оцінка координат і параметрів руху цілі за результатами ряду циклів огляду окремими засобами). Склад траєкторних даних, що оцінюються на етапі третинної обробки, може відрізнятися від аналогічних даних первинної (вторинної) обробки. Як правило також відрізняються системи координат окремих пунктів обробки.

Вимоги до точності РЛІ, що дозволяє видавати система третинної обробки, визначають задачі (пріоритети), які поставлено по цілям, а також можливості споживачів по обслуговуванню зазначених цілей. З іншого боку на точність третинної обробки суттєво впливають точності вимірювання координат і параметрів руху цілей окремих джерел РЛІ, точності екстраполяції, а також особливості вторинного випромінювання різних типів цілей.

Таким чином на практиці важливо знати результуючі точності вимірювання координат цілей при

об'єднанні РЛІ від різних джерел з урахуванням особливостей вторинного випромінювання цілей у різних діапазонах довжин хвиль. Наявна можливість апріорного визначення точнісних характеристик систем третинної обробки РЛІ дозволить пред'явити вимоги до точнісних характеристик джерел РЛІ (режимів їх функціонування), до їх територіального розташування, точності топоприв'язки, орієнтування і часової синхронізації, виходячи із необхідних складу і точності РЛІ, що видається споживачу. Крім того наявність зазначеної апріорної інформації дозволяє залучати для виконання завдань отримання і видачі РЛІ про цілі лише ті засоби радіолокації, які забезпечують необхідну точність оцінювання координат у заданому секторі простору і по цілям конкретного типу.

**Аналіз літератури.** Питанням об'єднання РЛІ від декількох джерел присвячено ряд робіт [1 – 8]. Зокрема у роботах [1, 3, 4] викладено основні співвідношення для розрахунку результуючих матриць точності вимірювання координат цілей при об'єднанні інформації від декількох (у загальному випадку різнорідних) РЛС, враховуючи системи координат, у яких проводять вимірювання зазначені засоби, за умов незалежних і одночасних вимірювань. Дані співвідношення взято за основу при розробці методу оцінювання потенційної результуючої точності вимірювання координат цілей при третинній обробці РЛІ. Разом з цим у відомій літературі відсутні достатні дані про використання апріорної інформації про результуючі точності вимірювання координат цілей і їх зміни у просторі при об'єднанні інформації від декількох джерел, для раціонального розташування джерел РЛІ на місцевості, для виділення при супроводженні цілей РЛІ засобів радіолокації, які забезпечують вимірювання координат із заданими показниками якості у заданому секторі простору, для пред'явлення вимог до точності топоприв'язки і орієнтування РЛС. Крім того у відомій

літературі при оцінці точнісних характеристик РЛС не в повній мірі використовуються особливості вторинного випромінювання різних типів цілей.

**Метою статті** є розробка методу оцінювання результуючої точності вимірювання координат цілей при об'єднанні РЛІ від декількох джерел з урахуванням ТТХ РЛС, просторових змін точностей окремих РЛС і вторинного випромінювання цілей.

**Основна частина**

Якість РЛІ, що видається споживачам (командні пункти ЗРВ, ВА, РЕБ), суттєво залежить від точностей оцінювання координат цілей окремими джерелами, які в свою чергу залежать від дальності до цілі і її висоти, типу цілі та інших факторів. При великій кількості цілей до автоматизованої системи управління (АСУ) надходить значний об'єм інформації, який потрібно обробити і видати споживачам. Для усунення надмірності інформації необхідно здійснювати її об'єднання. По кожній конкретній цілі при об'єднанні РЛІ необхідно використовувати інформацію лише тих РЛС, які у секторі простору, по якому проходить траєкторія цілі, мають точності поточних вимірювань не гірше заданих. У роботі розробляється метод розрахунку результуючої точності вимірювання координат цілей при об'єднанні РЛІ від декількох джерел з урахуванням систем координат зазначених джерел і АСУ, а також з урахуванням особливостей вторинного випромінювання цілей різних типів.

Розглянемо ситуацію коли N РЛС здійснюють оцінювання координат цілі у заданих секторах простору, які перекриваються. Інформація від зазначених РЛС поєднується АСУ. Кожне n-те джерело (n = 1, N) здійснює обробку і видачу РЛІ в своїй (прив'язаній до точки стояння джерела O<sub>n</sub>) сферичній системі координат (r – похила дальність, β – азимут, ε – кут місця, рис. 1). Точності поточного вимірювання координат, що характеризуються середньоквадратичними похибками (СКП) вимірювання координат σ<sub>m</sub>, σ<sub>βn</sub>, σ<sub>εn</sub>, темп огляду РЛС, що розглядаються, у загальному випадку різні. Вимірювання проводяться неодноразово. Таким чином n-а РЛС видає до АСУ оцінені значення вектору спостереження  $\hat{\theta}_n = (\hat{r}_n \ \hat{\beta}_n \ \hat{\epsilon}_n)^T$ , яким відповідають матриці точності поточного вимірювання  $\bar{C}_{\theta}$ , що за умов незалежних вимірювань є діагональними:

$$\bar{C}_{\theta_n} = \begin{pmatrix} \sigma_m^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\beta n}^{-2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\epsilon n}^{-2} \end{pmatrix}.$$

АСУ здійснює третинну обробку інформації, яка передбачає об'єднання РЛІ. При цьому інформація від різних джерел перераховується у загальну прямокутну систему координат (x, y, z), зображену на рис. 1. Оскі-

льки моменти часу, у які проводяться вимірювання n-ми джерелами, не співпадають, отримані оцінки перераховуються (екстраполюються) до єдиного часу, іншими словами оцінюється вектор стану на момент часу t<sub>k</sub>  $\hat{\alpha}_k = (\hat{x}_k \ \hat{y}_k \ \hat{z}_k)^T$ .

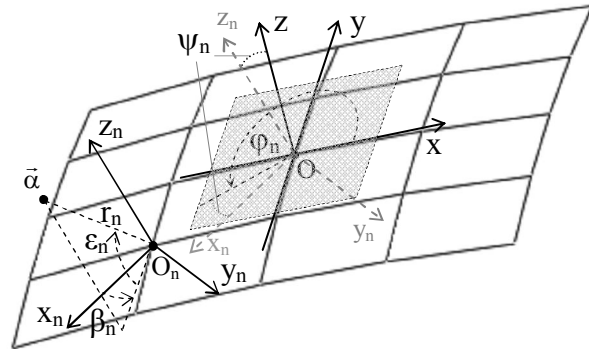


Рис. 1. Системи координат, що використовуються при третинній обробці

Розглянемо метод розрахунку результуючої точності вимірювань координат цілей при об'єднанні інформації від N різнорідних джерел.

**1. Розрахунок результуючої точності вимірювання координат цілей при об'єднанні РЛІ від декількох джерел**

Результуюча матриця точності вимірювання координат цілі при об'єднанні інформації від N джерел може бути обчисленою за допомогою співвідношення [1, 3, 4]:

$$\bar{C}_{\alpha} = \sum_{n=1}^N \bar{H}_n^T \bar{C}_{\theta n} \bar{H}_n, \tag{1}$$

де  $\bar{H}_n = \bar{H}_{n \text{ перек}} \bar{H}_{n \text{ пов}};$  (2)

$$\bar{H}_{n \text{ пов}} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_n) \cos(\psi_n) & \sin(\varphi_n) \cos(\psi_n) & -\sin(\psi_n) \\ -\sin(\varphi_n) & \cos(\varphi_n) & 0 \\ \cos(\varphi_n) \sin(\psi_n) & \sin(\varphi_n) \sin(\psi_n) & \cos(\psi_n) \end{pmatrix} \tag{3}$$

матриця повороту;

$$\varphi_n = \arctg(y_{0n}/x_{0n}) + 0,5\pi(2 - \text{sgn}(y_{0n}) - \text{sgn}(x_{0n})\text{sgn}(y_{0n})); \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x \geq 0, \\ 0, & \text{при } x < 0; \end{cases}$$

$$\psi_n = \arcsin(r_{0n}/r_{0n});$$

$r_{r0n} = \sqrt{x_{0n}^2 + y_{0n}^2}; r_{0n} = \sqrt{r_{r0n}^2 + z_{0n}^2}; x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}$  – координати точки стояння n-ї РЛС в загальній прямокутній системі координат;

$$\bar{H}_{n \text{ перек}} = \begin{pmatrix} \frac{x_n}{r_n} & \frac{y_n}{r_n} & \frac{z_n}{r_n} \\ -\frac{y_n}{r_n^2} & \frac{x_n}{r_n^2} & 0 \\ -\frac{x_n z_n}{r_n^2 r_{rn}} & -\frac{y_n z_n}{r_n^2 r_{rn}} & \frac{r_{rn}}{r_n^2} \end{pmatrix} \tag{4}$$

матриця переходу від сферичних координат до декартових;  $x_n = x - x_{0n}$ ;  $y_n = y - y_{0n}$ ;  $z_n = z - z_{0n}$ ;  $r_{1n} = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}$ ;  $r_n = \sqrt{r_{1n}^2 + z_n^2}$ .

Слід зазначити, що матриці точності  $\bar{C}_\alpha$  у виразі (1) відносяться до одного моменту часу.

Матричне співвідношення (1) встановлює зв'язок між СКП вимірювання сферичних координат окремими РЛС  $\sigma_m$ ;  $\sigma_{\beta n}$ ;  $\sigma_{\epsilon n}$  і СКП  $\sigma_x$ ;  $\sigma_y$ ;  $\sigma_z$  оцінювання координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  при об'єднанні інформації від зазначених джерел РЛС, які у свою чергу визначаються діагональними елементами матриці  $\bar{D}_\alpha = \bar{C}_\alpha^{-1}$ :

$$\sigma_x = \sqrt{D_{\alpha 11}}, \quad \sigma_y = \sqrt{D_{\alpha 22}}, \quad \sigma_z = \sqrt{D_{\alpha 33}}. \quad (5)$$

Співвідношення (1) може бути застосованим і при інших системах координат, що використовуються. Від цього залежить конкретний вигляд матриць (2) – (4).

У загальному випадку потенційні СКП вимірювання сферичних координат обчислюються за формулами [1, 3]:

СКП вимірювання похилої дальності –

$$\sigma_r = \frac{c}{2q\Pi_{\text{эф}}}, \quad (6)$$

де  $c = 3 \times 10^8$  м/с;  $\Pi_{\text{эф}}$  – ефективна ширина спектру зондувального сигналу ( $\Pi_{\text{эф}} = 1/\tau_{\text{имп}}$  у випадку використання у якості зондувального прямокутного немодульованого радіоімпульсу тривалістю  $\tau_{\text{имп}}$ );  $q$  – відношення "сигнал-шум" (ВСШ) за напругою у пристрої вимірювання шуканого параметру прийнятого сигналу;

СКП вимірювання кутових координат –

$$\sigma_{\beta(\epsilon)} = \frac{1}{qL_{\text{эфн}} \beta(\epsilon)}, \quad (7)$$

де для дзеркальної антени –

$$L_{\text{эфн}} \beta(\epsilon) = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{L_{\beta(\epsilon)}}{\lambda_0}, \quad (8)$$

$L_{\beta(\epsilon)}$  – розмір антени у азимутальній (кутомісній) площині,  $\lambda_0$  – довжина зондувальної хвилі РЛС;

для фазованної антенної решітки (ФАР) –

$$L_{\text{эфн}} \beta(\epsilon) = \frac{\pi}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{M_{\beta(\epsilon)} - 1}}{\lambda_0} d_{\beta(\epsilon)} \left| \cos(\theta_{\beta(\epsilon)}) \right|, \quad (9)$$

де  $M_{\beta(\epsilon)}$ ,  $d_{\beta(\epsilon)}$ ,  $\theta_{\beta(\epsilon)}$  – кількість елементів в ФАР, відстань між елементами ФАР і кут відхилення променя ФАР від нормального напрямку у азимутальній (кутомісній) площині відповідно.

У свою чергу ВСШ, що входить до виразів (6), (7), є функцією дальності до цілі і кута місця (іншими словами є функцією координат  $x$ ;  $y$ ;  $z$ ). З урахуванням рівняння дальності дії суміщеного локатора і вертикального перерізу зони видимості РЛС ВСШ може бути поданим наступним чином:

$$q(r, \epsilon) = q_0 \left( \frac{r_0(\epsilon)}{r} \right)^2, \quad (10)$$

де  $q_0$  – значення ВСШ для максимальної дальності  $r_0(\epsilon)$ , що залежить від кута місця.

Таким чином співвідношення (1) – (10) дозволяють розраховувати СКП вимірювання прямокутних координат  $\sigma_x$ ;  $\sigma_y$ ;  $\sigma_z$  при об'єднанні інформації від декількох джерел, як функції координат  $x$ ;  $y$ ;  $z$ , ТТХ окремих джерел РЛС (параметрів їх зон видимості).

Формули (6), (7) характеризують потенційні точності вимірювання координат. Реальні точності РЛС як правило гірші за потенційні. Очевидно при оцінюванні точнісних характеристик існуючих систем третинної обробки формули (6) – (10) потрібно уточнювати з урахуванням характеристик реалізованих технічних пристроїв локаторів і режимів їх роботи.

## 2. Врахування характеристик вторинного випромінювання різних типів цілей при оцінюванні похибок вимірювання координат

Зони видимості РЛС, їх точнісні характеристики, як правило, відомі для конкретної (еталонної) цілі. На практиці зазначені параметри можуть суттєво відрізнятись для різних типів цілей. З рівняння дальності дії суміщеного локатора витікає, що при фіксованій дальності цілі ВСШ змінюється пропорційно кореню квадратному її ефективної поверхні розсіювання (ЕПР)  $s_{ц}$ :

$$q(r, \epsilon) = q_0 \left( \frac{r_0(\epsilon)}{r} \right)^2 \sqrt{\frac{s_{ц}}{s_{ц0}}}, \quad (11)$$

де  $s_{ц0}$  – ЕПР еталонної цілі, для якої відомі ВСШ  $q_0$  і  $r_0(\epsilon)$ .

ЕПР радіолокаційних цілей залежить від довжини зондувальної хвилі, від ракурсу опромінювання цілі. Залежності ЕПР різних типів цілей від вказаних факторів можуть бути отриманими за допомогою натурального експерименту або шляхом математичного моделювання. Проведення натурних експериментів пов'язано із значними фінансовими і ресурсними витратами, а для повітряних об'єктів інших країн світу взагалі неможливо. Тому використання чисельних методів розрахунку характеристик вторинного випромінювання є більш прийнятним. У монографії [10] запропоновано високочастотний

асимптотичний метод розрахунку характеристик розсіювання радіолокаційних об'єктів великих електричних розмірів. Запропонований у роботі [10] метод і створений на його основі чисельний алгоритм дозволяють моделювати характеристики вторинного випромінювання більшості сучасних повітряних об'єктів у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль. Разом з цим слід відзначити, що добре відомі високочастотні асимптотичні методи не дозволяють із прийнятною точністю розраховувати характеристики вторинного випромінювання об'єктів резонансних розмірів (ракети різного призначення, легкомоторні літаки у метровому діапазоні довжин хвиль). Для моделювання характеристик вторинного випромінювання зазначених об'єктів резонансних розмірів доцільно використовувати метод, заснований на розв'язанні інтегральних рівнянь, запропонований у роботі [11].

За допомогою запропонованих у роботах [10, 11] методів можуть бути отримані значення ЕПР засобів повітряного нападу у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах довжин хвиль для різних ракурсів. Напрямки імовірних повітряних ударів, як правило, заздалегідь відомі. Тому у формулі (11) необхідно використовувати усереднені (медіанні) значення ЕПР цілей у деяких секторах ракурсів у кутомісній і азимутальній площинах. При цьому сектор усереднення залежить від маневрених можливостей цілей.

Очевидно зазначений сектор буде більшим для маневруючих цілей (тактична авіація) і значно менший для крилатих ракет. В залежності від інформації про можливі ракурси цілей буде залежати точність розрахунку СКП оцінювання координат за формулами (1) – (11).

Таким чином за допомогою формули (11), подальшого використання залежності ВСШ від ЕПР цілі  $s_{\text{ц}}$  у співвідношеннях (6), (7), за допомогою (1) – (5) можуть бути розрахованими результуючі СКП вимірювання координат для конкретного типу цілі.

### 3. Результати розрахунку результуючої точності вимірювання координат цілей при об'єднанні РЛІ від декількох джерел і рекомендації щодо використання зазначених результатів

На основі співвідношень (1) – (9), (11) створено алгоритм чисельного розрахунку, за допомогою якого проведено розрахунки результуючої точності вимірювання координат при об'єднанні інформації від декількох різнорідних РЛС. Обчисленню підлягали СКП  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , як функції координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (рис. 1). Розрахунки проводились для фіксованої висоти  $h$  над сферичною поверхнею Землі. У якості джерел РЛІ використовувались:

– трикоординатна РЛС бойового режиму 19Ж6

(середня довжина хвилі  $\lambda_0=10$  см; режим 3, мінімальне і максимальне значення кута місця складають відповідно  $\varepsilon_{\text{min}}=-20'$  і  $\varepsilon_{\text{max}}=+30'$ , сектор огляду за азимутом  $360^\circ$ . Радіус "мертвої зони"  $R_{\text{мз}}=2h$ . Максимальна дальність дії є функцією кута місця і конструктивно обмежена значенням 150 км. СКП вимірювання сферичних координат на дальності  $r$  до 70 км складають  $\sigma_r \leq 250$  м,  $\sigma_\beta \leq 20'$ , СКП вимірювання висоти  $\sigma_h \leq 400$  м при  $\varepsilon \leq 6^\circ$  та  $\sigma_h \leq 1500$  м при  $\varepsilon > 6^\circ$  [9]);

– двокоординатна РЛС чергового режиму 5Н84А ( $\lambda_0=1,7$  м; режим верхнього променя,  $\varepsilon_{\text{min}}=0^\circ$  і  $\varepsilon_{\text{max}}=+17^\circ$ , сектор огляду за азимутом  $360^\circ$ ,  $R_{\text{мз}}=3,5h$ . Максимальна дальність дії є функцією кута місця і змінюється від 30 до 360 км. СКП вимірювання координат при  $r \leq 200$  км складають  $\sigma_r \leq 1000$  м,  $\sigma_\beta \leq 1^\circ$  [9]);

– висотомір ПРВ-13 ( $\lambda_0=10$  см; режим висотоміра,  $\varepsilon_{\text{min}}=-2^\circ$  і  $\varepsilon_{\text{max}}=+30^\circ$ ,  $R_{\text{мз}}=1,8h$ ,  $\sigma_h \leq 300$  м при  $r \leq 200$  км та  $\sigma_h \leq 500$  м при  $r > 200$  км [9]).

Розрахунки у даній статті проводились для горизонтальної поляризації зондувальних хвиль.

СКП вимірювання координат зазначених РЛС визначаються їх конструктивними можливостями. Зазначені параметри визначені для цілі типу Міг-21.

На рис. 2 – 4 лініями рівня зображено залежності  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  від координат  $x$ ,  $y$  (рис. 1) для наступних вхідних параметрів: ціль F-16, висота цілі над поверхнею Землі постійна і складає  $h=2$  км.

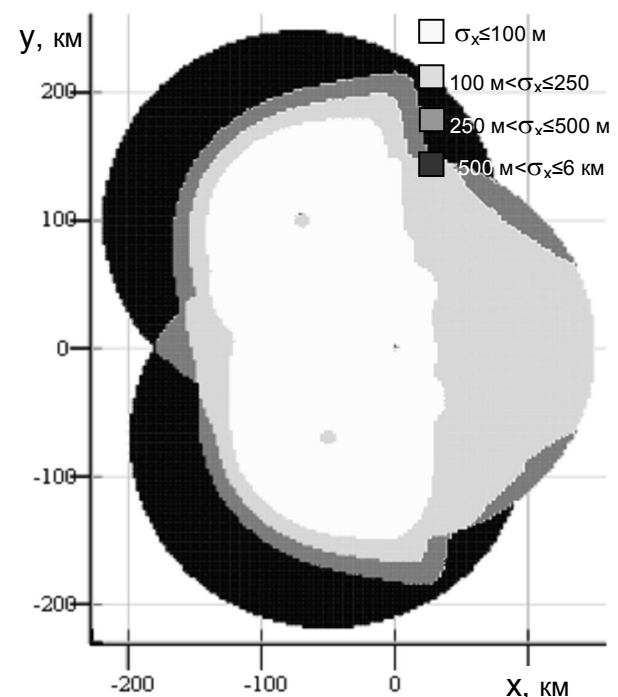


Рис. 2. Залежність результуючої  $\sigma_x$  від просторових координат  $x$ ,  $y$  для F-16 на фіксованій висоті  $h=2$  км

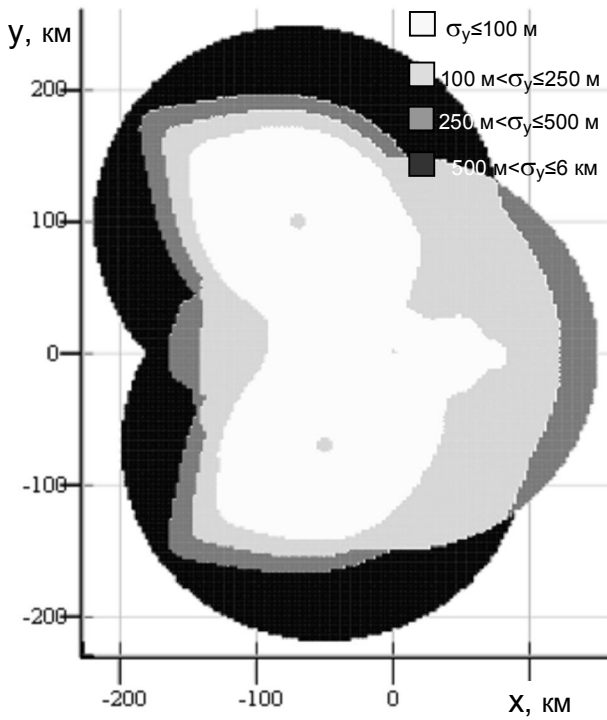


Рис. 3. Залежність результуючої  $\sigma_y$  від просторових координат  $x, y$  для F-16 на фіксованій висоті  $h=2$  км

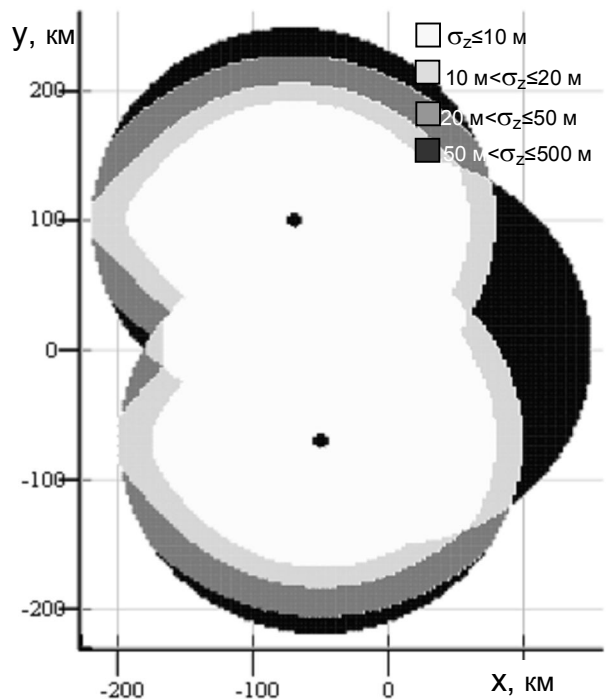


Рис. 4. Залежність результуючої  $\sigma_z$  від просторових координат  $x, y$  для F-16 на фіксованій висоті  $h=2$  км

Також на рис. 2 – 4: РЛС 1 – 19Ж6, координати точки стояння  $x_{01}=y_{01}=z_{01}=0$ ; РЛС 2 – 5Н84А,  $x_{02}=-70$  км,  $y_{02}=100$  км,  $z_{02}=-1,17$  км; РЛС 3 – 5Н84А,  $x_{03}=-50$  км,  $y_{03}=-70$  км,  $z_{03}=-0,581$  км. Відстані між локаторами складають: між РЛС 1 і 2 – 122 км, РЛС 1 і 3 – 86 км, РЛС 2 і 3 – 171 км. Сумісно із 5Н84А для вимірювання третьої координати використовувались

висотоміри ПРВ-13.

При розрахунках згідно формули (11) використовувались медіанні значення розподілу ЕПР F-16 у секторі ракурсів  $\varepsilon_{ц} = -3...+4^\circ$  у кутомісній площині і  $\beta_{ц} = 0...45^\circ$  у азимутальній площині (нульовим значенням  $\beta_{ц}, \varepsilon_{ц}$  відповідає зондування у ніс, значення  $\varepsilon_{ц} < 0$  відповідають нижній полусфері відносно площини крила цілі) [10]. Розраховані медіанні значення розподілу ЕПР F-16 складають  $s_{цм} = 0,42$  м<sup>2</sup> при  $\lambda_0 = 10$  см і  $s_{цм} = 0,86$  м<sup>2</sup> при  $\lambda_0 = 1,7$  м.

При розглянутому розташуванні РЛС їх зони видимості на висоті  $h=100$  м не перекриваються, об'єднання інформації не є доцільним. Тому для розрахунку результуючих СКП  $\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z$  у системі із зазначених РЛС стосовно до КР AGM86С на постійній висоті від поверхні Землі  $h=100$  м використовувалось розташування джерел РЛІ у кутах рівностороннього трикутника із стороною 60 км: РЛС 1 (19Ж6), координати точки стояння  $x_{01}=y_{01}=z_{01}=0$ ; РЛС 2 – 5Н84А,  $x_{02}=-52$  км,  $y_{02}=30$  км,  $z_{02}=-0,283$  км; РЛС 3 – 5Н84А,  $x_{03}=-52$  км,  $y_{03}=-30$  км,  $z_{03}=-0,283$  км. Сумісно із 5Н84А для вимірювання третьої координати використовувались висотоміри ПРВ-13. Відповідні результати розрахунку СКП наведено на рис. 5 – 7.

При оцінці результуючої точності розглянутої системи джерел РЛІ щодо вимірювання координат КР було прийнято, що напрямок удару КР відомий і у азимутальній площині (площина ХОZ, рис. 1) складає сектор кутів  $\pm 45^\circ$  від вісі ОХ. Таким чином при розрахунках використовувались медіанні значення розподілу ЕПР КР AGM86С у азимутальних секторах:  $0...45^\circ, 45...135^\circ, 135...180^\circ$  в залежності від ракурсу цілі відносно кожної РЛС. У кутомірній площині як і минулому прикладі використовувався сектор ракурсів  $-3...+4^\circ$ .

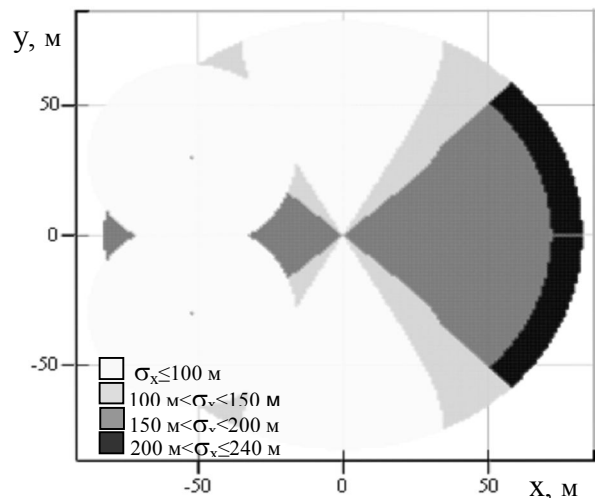


Рис. 5. Залежність результуючої  $\sigma_x$  від просторових координат  $x, y$  для КР AGM86С на фіксованій висоті  $h=100$  м

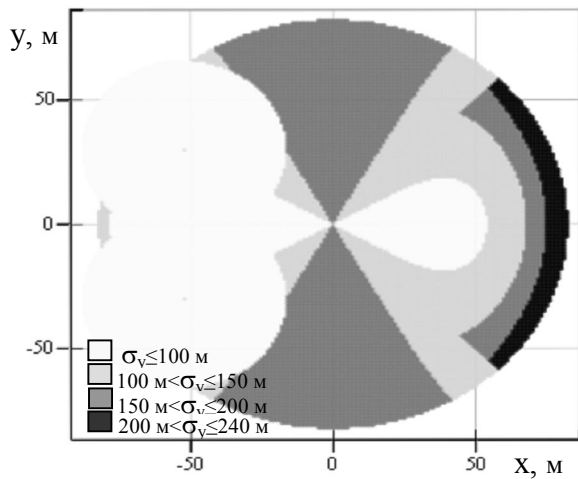


Рис. 6. Залежність результуючої  $\sigma_y$  від просторових координат  $x, y$  для КР AGM86С на фіксованій висоті  $h=100$  м

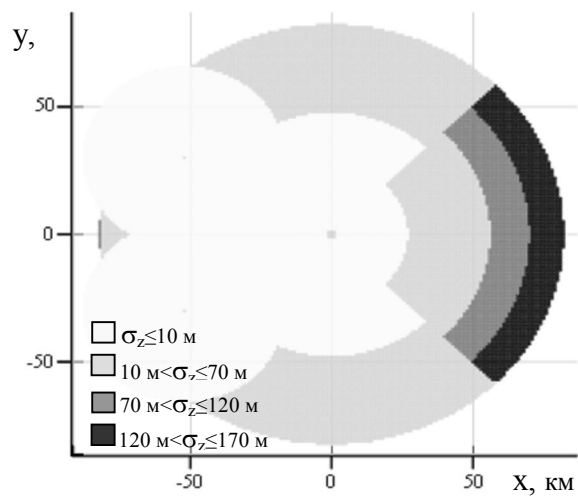


Рис. 7. Залежність результуючої  $\sigma_z$  від просторових координат  $x, y$  для КР AGM86С на фіксованій висоті  $h=100$  м

Для  $\lambda_0=10$  см значення  $s_{цм}$  розраховувались за допомогою методу, викладеного у монографії [10], а при  $\lambda_0=1,7$  м згідно методу, описаному у роботі [11]. Значення  $s_{цм}$ , що використовувались при моделюванні, подано у табл. 1.

Таблиця 1

Медіанні значення розподілу ЕПР КР AGM86С за азимутальними секторами

| $\lambda_0, \text{ м}$ | $s_{цм}, \text{ м}^2$                  |           |            |
|------------------------|--|-----------|------------|
|                        | Сектор ракурсів у азимутальній площині |           |            |
|                        | 0 – 45°                                | 45 – 135° | 135 – 180° |
| 0,1                    | 0,01                                   | 0,21      | 0,06       |
| 1,7                    | 1,70                                   | 2,03      | 3,86       |

Результати, що дозволяє отримувати розроблений метод, мають широкий спектр застосування при вирішенні наступних практичних задач:

– оцінка результуючої точності вимірювання координат систем третинної обробки у заданому секторі простору для різних типів цілей;

– пред'явлення вимог до точнісних характеристик систем первинної і вторинної обробки (окремих джерел РЛ). Необхідні точності вимірювання РЛС, що видають інформацію на АСУ, можуть бути знайденими безпосередньо з результируючих точностей, вимоги до яких висуває споживач РЛІ, за допомогою матричного співвідношення (1);

– пред'явлення вимог до точності топоприв'язки окремих РЛС та їх орієнтування у просторі. Ці вимоги витікають безпосередньо із необхідних точностей поточного вимірювання окремих РЛС. Очевидно, що похибки топоприв'язки повинні бути на порядок меншими за мінімально можливі (у зоні видимості) СКП поточного вимірювання прямокутних координат (або похилої дальності) РЛС. Аналогічно похибки орієнтування антени РЛС у азимутальній і кутомісній площинах повинні бути на порядок меншими за мінімально можливі СКП поточного вимірювання відповідних координат. Враховуючи точнісні характеристики РЛС, що стоять на озброєнні у Повітряних Силах Збройних Сил України, а також можливості сучасних систем визначення місцезнаходження, похибки топоприв'язки можуть складати одиниці метрів, а похибки орієнтування антени – одиниці кутових хвилин;

– пред'явлення вимог до темпу огляду простору, режимів функціонування РЛС. Зазначені вимоги також обумовлюються необхідними точнісними характеристиками систем третинної обробки, оскільки об'єднання інформації пов'язане із жорсткою часовою синхронізацією окремих рознесених джерел РЛІ, які здійснюють поточні вимірювання у різні моменти часу. Темп огляду повинен забезпечувати можливість використання порівняно простих (можливих для практичної реалізації) моделей руху цілей з урахуванням їх можливостей щодо маневру за координатами і параметрами руху для екстраполяції зазначених параметрів траєкторій цілей на фіксований момент часу. Необхідний темп оновлення інформації в системах вторинної і третинної обробки визначає максимальна швидкість руху цілей різних типів і їх маневрені можливості;

– оптимізація розміщення джерел РЛІ у просторі (перекриття їх зон видимості) для отримання заданих точнісних характеристик систем третинної обробки у заданому секторі простору для визначених типів цілей;

– вибір кількості і типів джерел РЛІ для забезпечення необхідної точності вимірювання координат і видачі цілевказання у всьому діапазоні висот, для заданих типів цілей. Наведені результати свідчать про доцільність використання у системах третинної обробки РЛС різних діапазонів довжин хвиль. Про це свідчать графіки, зображені на рис. 5 – 7, які показують, що потенційно гірша точність поточного вимірювання координат метрових РЛС чергового режиму (у порівнянні із сантиметровими РЛС бойового режиму) компенсується більшою ЕПР КР у метровому діапазоні.

Методика може бути застосованою для оцінки точнісних характеристик як існуючих угруповань, так і перспективних систем, що поєднують різні радіотехнічні системи.

### Висновки

В роботі розроблено метод розрахунку результуючої точності оцінювання координат цілей при об'єднанні РЛІ від декількох, у загальному випадку, різних РЛС. Метод дозволяє при оцінці результуючої точності враховувати ТТХ РЛС, режими їх функціонування, розташування РЛС на місцевості, а також особливості вторинного випромінювання різних типів цілей. Окрім безпосереднього розрахунку точностей оцінювання координат запропонований метод дозволяє пред'являти вимоги до окремих джерел РЛІ (точність топоприв'язки і орієнтування, темп видачі інформації, параметри зон видимості, точності поточного вимірювання координат), інформація яких залучається до третинної обробки на підставі вимог споживачів РЛІ. Метод може бути застосованим для оцінки можливостей як існуючих угруповань, так і перспективних.

Розраховані заздалегідь зони точності можуть бути використаними у процесі третинної обробки для вибору джерел РЛІ, які забезпечують найкращі показники якості вимірювання координат конкретного типу цілей у заданому секторі простору, що забезпечить не тільки підвищення якості третинної обробки.

Одним з основних напрямків подальшого розвитку методу є врахування при розрахунках точнісних характеристик рельєфу місцевості.

### Список літератури

1. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

2. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: Изд. КВИЦ, 2000. – 428 с.

3. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

4. Войтович С.А. Траскторна обробка локаційної інформації / С.А. Войтович, Х.А. Турсунходжаєв. – Х.: ХУ ПС, 2008. – 112 с.

5. Багдасарян С.Т. Оптимизация оценивания координат объекта многопозиционной радиолокационной системой при избыточности информации / С.Т. Багдасарян, В.Р. Хачатуров // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37, № 10. – С. 1839-1846.

6. Войтович С.А. Метод об'єднання інформації про повітряні об'єкти від сукупності різномісцевих джерел / С.А. Войтович, С.Ю. Стасєв, В.О. Корнєєв // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – Вип. 4(16). – С. 54-57.

7. Седишев Ю.М. Про можливість визначення висоти повітряних цілей в мультирадарній системі двокоординатних оглядових РЛС / Ю.М. Седишев, В.О. Тютюнник, А.Ф. Шевченко // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – Вип. 2(22). – С. 159-164.

8. Гриб Д.А. Об'єднання двокоординатних РЛС чергового режиму в мультирадарну систему для створення зони видачі бойової радіолокаційної інформації / Д.А. Гриб, В.О. Тютюнник, О.В. Зайцев // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2011. Вип. 1(5). – С. 78-82.

9. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торочин та ін. – К.: МО України, Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.

10. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др. / под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУ ПС, 2009. – 468 с.

11. Моделирование характеристик рассеяния воздушных объектов резонансных размеров в метровом диапазоне волн / О.И. Сухаревский, Г.С. Залевский, С.В. Нечитайло, И.О. Сухаревский // Известия вузов. Радиотехника. – 2010. – Т. 53, № 4. – С. 51-57.

Надійшла до редколегії 11.10.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ЦЕЛИ ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ С УЧЕТОМ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЦЕЛИ

Д.А. Гриб, Г.С. Залевский

Предлагается метод оценивания результирующей точности измерения координат цели при объединении радиолокационной информации от нескольких источников. Оценивание точности измерения осуществляется с учетом используемых систем координат, тактико-технических характеристик радиолокационных станций (РЛС) и их изменения в пределах зон видимости. Метод также позволяет учесть характеристики вторичного излучения объектов локализации в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. В статье демонстрируются результаты расчетов точности измерения координат истребителя F-16 и крылатой ракеты AGM86C при объединении информации РЛС метрового и сантиметрового диапазонов.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, вторичное излучение, объединение радиолокационной информации, потенциальная точность измерения, потребители радиолокационной информации.

### CALCULATION OF RESULTING ACCURACY OF TARGET COORDINATE MEASURING UNDER INTEGRATION OF RADAR INFORMATION FROM SOME SOURCES IN ACCOUNT WITH TARGET SECONDARY RADIATION

D.A. Grib, G.S. Zalevsky

Method of estimation of a resulting accuracy of target coordinate measuring under integration of radar information from some sources is proposed. Estimation of observation accuracy is realized taking into account used coordinate systems, radar performance characteristics and its modification within visibility zones. Method also permits taking into account a target secondary radiation characteristics in VHF, UHF and SHF bands. Results of calculation of the fighter F-16 and the cruise missile AGM86C coordinate measuring accuracy in the case of VHF and SHF radar information integration are demonstrated in the paper.

**Keywords:** automated control system, consumers of radar information, potential observation accuracy, radar information integration, secondary radiation.