

## ДАЛЬНОСТЬ РАДІОТЕПЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ДВОХПОЗИЦІЙНОЮ РАДІОМЕТРИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ

Запропоновано варіант рівняння дальності радіотеплокаційного спостереження двохопозиційною радіометричною системою (РМС). Це дозволяє забезпечити моделювання РМС в залежності від її технічних характеристик по означеним малорозмірним повітряним цілям. Визначенні напрямки реалізації найбільшої дальності дії РМС та її збільшення, якщо ціль має доплерівську поправку частоти. Розкрито сутність обґрунтування варіанту рівняння дальності двохопозиційної РМС, що пропонується. Представлені отримані аналітичні вирази для розрахунків та графічний матеріал.

**Ключові слова:** повітряна ціль, фон, який корельовано, дальність спостереження радіометричною системою, доплерівська поправка частоти.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Ряд науково-технічних задач потребує визначення дальності радіотеплокаційного спостереження двохопозиційною радіометричною системою (РМС) [1 – 4]. У теперішній час відсутній вираз для розрахунку вказаної дальності. Тому задача обґрунтування варіанту рівняння дальності спостереження двохопозиційної РМС є важливою та актуальною.

**Аналіз публікацій,** які представлені у статтях [3 – 5, 9, 13] та патентах [6, 7] не надає можливості визначити дальність радіотеплокаційного спостереження двохопозиційною РМС. У цих статтях є окремі елементи побудови та результати обробки зображень радіояскравих температур об'єктів, що досліджуються.

**Метою статті** є обґрунтування варіанту рівняння дальності радіотеплокаційного спостереження двохопозиційною РМС та формування напрямків реалізації найбільшої дальності дії при виявленні малорозмірних повітряних цілей (Ц).

### Виклад основного матеріалу

Двохопозиційна РМС [1 – 7, 13] складається з двох рознесених у просторі антен на величину бази та приймальних систем, багатохвильової лінії затримки, кореляторів з пороговими пристроями. Малорозмірні Ц [8, 9] – це об'єкти, площа яких суттєво менше площини, з якої приймається радіометричні сигнали. Ці Ц мають незначну різницю радіояскравих температур відносно фону, що корельований від атмосфери та земної поверхні. Діаграмну направленість радіометричного випромінювання корпусу Ц будемо враховувати ненаправленою [1, 14, 15].

Потужність корисного сигналу Ц визначається співвідношенням тілесного кута, зайнятого ціллю  $\Omega_{Ц}$ , та тілесним кутом головної пелюстки діаграми

спрямованості антен  $\Omega_{ГЛ}$  [1, 14 – 16]:

$$\delta = \Omega_{Ц} / \Omega_{ГЛ}, \quad (1)$$

де  $\Omega_{Ц} = S/R^2$ ,  $\Omega_{ГЛ} = 4\pi\eta/G$ , (2) причому:  $S$  – площа Ц;  $R$  – дальність до Ц, яка спостерігається;  $\eta, G$  – відповідно коефіцієнти корисної дії антен та їх коефіцієнт підсилювання [10], де:

$$G = \left( 3,2 \cdot 10^4 L_1 L_2 \right) / \left[ \lambda^2 \left( 180\pi^{-1} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$L_1, L_2$  – розміри антен у горизонтальній та вертикальній площинах відповідно;  $\lambda$  – центральна довжина хвилі РМС.

При умові однакових розмірів антен у системі  $L_1$  з виразів (1), (2) отримуємо:

$$\delta = (SG) / (4\pi\eta R^2). \quad (4)$$

Антенна температура РМС  $T_a$  у кожному пункті прийому, при наявності корисного сигналу Ц дорівнює [1, 14 – 16]:

$$T_a = (1-\beta)\eta[T_{атм} + T_3 \Delta + T\delta] + \beta\eta \times (T_{атм} + T_3) + (1-\eta)T_0. \quad (5)$$

Перший доданок означає антенну температуру прийняту у  $\Omega_{ГЛ}$ , другий доданок – зовні  $\Omega_{ГЛ}$ , а третій доданок характеризує особисті шуми антен, причому:  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує частку ненаправленого випромінювання, яке приймається антеною зовні  $\Omega_{ГЛ}$ ;  $T_{атм}, T_3, T$  – відповідно шумові (радіояскраві) температури атмосфери землі та Ц;  $\Delta$  – рівень прийому сигналів від землі (поверхні, що підстилає), по боковим пелюсткам діаграм спрямованості антен;  $T_0$  – температура матеріалу антен (середища яке її оточує).

Радіояскрава температура цілі  $T$  залежить від її випромінювальної здатності  $\chi$ , зенітного кута спо-

стерезення  $\varphi$  та термодинамічної температури  $T_T$ , так:  $T(\varphi) = \chi(\varphi) T_T$  [1]. Значення  $\chi(\varphi)$  змінюється у межах від 0,73 до 0,58 для автомобіля, який знаходиться на однорідній поверхні [9]. З врахуванням температури корпусу літака  $T_T$  [17],  $T(\varphi)$  дорівнює від  $\sim 115$  К до  $\sim 470$  К. Якщо швидкість польоту літака  $V \sim 250$  м/с [17] та  $\varphi \sim 20^\circ$  то  $T \sim 230$  К.

Радіоєскраве випромінювання завад  $T_{\Pi}$  (корельованого фону) при відсутності сигналу Ц на вході системи визначається виразом:

$$T_{\Pi} = (1-\beta)\eta[T_{\text{атм}} + T_3 \Delta] + \beta\eta \times (T_{\text{атм}} + T_3) + (1-\eta)T_0. \quad (6)$$

Якщо у РМС однакові антени та канали прийому то відношення сигнал-завада  $\gamma_i \times (i = 1, 2)$  у кожному з каналів дорівнює [12, 14 – 16]:

$$\gamma_i = P_{ci} / P_{\Pi i} = (P_{ai} - P_{\Pi i}) / P_{\Pi i}, \quad (7)$$

де  $P_{ai}$ ,  $P_{\Pi i}$  – відповідно потужність сигналів на вході РМС при наявності та відсутності сигналу від Ц, так [11, 14 – 16]:

$$P_{ai} = k T_0 \Pi_{\text{вх}} \left( K - 1 + \frac{T_{ai}}{T_0} \right); \quad (8)$$

$$P_{\Pi i} = k T_0 \Pi_{\text{вх}} \left( K - 1 + \frac{T_{\Pi i}}{T_0} \right),$$

$k$  – постійна Больцмана;  $\Pi_{\text{вх}}$ ,  $K$  – входна смуга пропускання і коефіцієнт шуму каналів РМС відповідно.

Провівши ряд математичних перетворень, з формул (1) – (8) здобули  $\gamma_1$  для першого каналу прийому РМС [14 – 16]:

$$\gamma_1 = \frac{(1-\beta_1) T S G_1}{4 \pi R_1^2 A}, \quad (9)$$

де  $A = T_0 (K_1 - \eta_1) + \eta_1 \{ T_3 [\Delta_1 + \beta_1 (1 - \Delta_1)] + T_{\text{атм}} \}$ .

Після кореляційного стискання, тобто оцінювання взаємної кореляційної функції в РМС, відношення сигнал-завада  $\nu$  на виході системи визначається з виразу [12]:

$$\nu = \frac{\Pi_{\text{вх}} \Pi_{\text{вих}}^{-1} \rho^2}{1 + \rho^2}, \quad (10)$$

де  $\Pi_{\text{вих}}$  – вихідна смуга пропускання кореляційного радіометра;  $\rho$  – коефіцієнт кореляції входних коливань, причому [12]:

$$\rho = \sqrt{\left[ (1 + \gamma_1^{-1}) (1 + \gamma_2^{-1}) \right]^{-1}}. \quad (11)$$

Значення  $\gamma_1, \gamma_2$  визначаються виразом (7), а відношення  $\Pi_{\text{вх}} / \Pi_{\text{вих}}$  є коефіцієнт кореляційного стискання  $K_{\text{сж}}$  [12].

Якщо  $\gamma_1 \neq \gamma_2$  з (10) та (11) здобули [15]:

$$\gamma_1 = \frac{\nu(1 + \gamma_2)}{\gamma_2 K_{\text{сж}} - \nu(1 + 2\gamma_2)}. \quad (12)$$

Коли дальність до Ц суттєво більше відстані між антенами кореляційного радіометра, а також однакові технічні характеристики його антен і каналів прийому, тобто  $\gamma_1 = \gamma_2$ , значення  $\gamma$  визначається з рівняння:

$$\gamma^2 (2\nu - K_{\text{сж}}) + 2\nu\gamma + \nu = 0. \quad (13)$$

Порівнявши праві частини виразів (9) та (12), отримали рівняння дальності дії двохпозиційної РМС [15, 16]:

$$R_1 = \sqrt{\frac{(1-\beta_1) T S G_1 [K_{\text{сж}} \gamma_2 - \nu(1 + 2\gamma_2)]}{4 \pi \alpha \nu (1 + \gamma_2) L A}}, \quad (14)$$

де  $R_1$  – дальність до Ц від I пункту прийому системи;  $\alpha$  – const кореляційного радіометра;  $L$  – втрати в РМС;  $\nu$  – відношення корисного сигналу до сигналів, що заважають, при якому забезпечується імовірність вірного виявлення  $P_B$  з фіксованим рівнем помилкової тривоги  $F$ , причому:  $P_B = F^{(1+\nu)^{-1}}$ .

На рис. 1 представлені результати розрахунку за виразом (14) при наступних типових технічних характеристиках [9 – 11, 15, 16]:

$\eta = 0,78$ ;  $\lambda = 2 \cdot 10^{-2}$  м;  $\beta = 0,3$ ;  $L_1 = L_2 = 125 \lambda$ ;  
 $T_{\text{атм}} = 300$  К;  $T_3 = 250$  К;  $T = 230$  К;  $K = 1,5$ ;  
 $T_0 = 290$  К;  $\Pi_{\text{вх}} = 10^9$  Гц;  $\Delta = 10^{-2}$ ;  $\Pi_{\text{вих}} = 1$  Гц;  
 $\nu = 5,64$ ;  $P_B = 0,5$ ;  $F = 10^{-2}$ ;  $L = 2$ ;  $\alpha = \sqrt{2}$ ;  
 $S$  – змінюється у межах від  $0$  м<sup>2</sup> до  $20$  м<sup>2</sup>.

Крива I на рис. 1 відмічена тире, вказує на значення дальності дії РМС  $R(S)$ . Коли  $S$  дорівнює  $10$  м<sup>2</sup>, то  $R(10) \sim 13,5$  км. При збільшенні площина Ц до  $20$  м<sup>2</sup> підвищується значення  $R(20) \sim 19,1$  км, крива I. З зміною  $T$  Ц значення  $R$  мають вид, як за кривою I рис. 1.

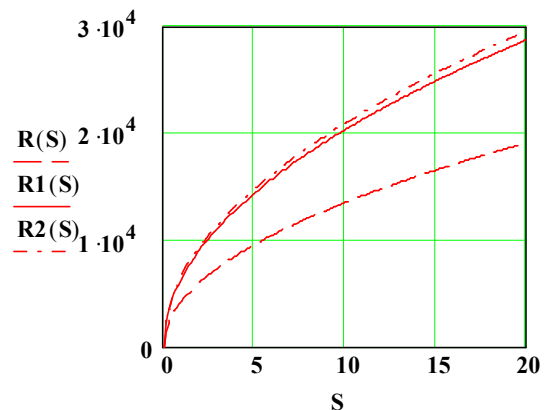


Рис. 1. Дальність радіотеплолокаційного спостереження двохпозиційною РМС  $R$  в залежності від площина цілі  $S$

Заради перевірки виразу (14) використали рівняння дальності радіотеплолокаційного спостереження одноканальною РМС [1].

Величина дальності дії одноканальним радіометром потужності практично співпадає з здобутими відповідними значеннями  $R$ . Вказана різниця обумовлена наявністю у двохпозиційній РМС кореляційного радіометра та впливу фону, що корельований. Тобто, двохпозиційна РМС в змозі виявляти сигнали малорозмірних малокоонтрастних повітряних цілей практично з тієї ж дальності, як і одноканальні РМС.

Якщо РМС має прямокутний амплітудо-частотний спектр, то ТН (тіло невизначеності) на її виході виду  $(\sin x/x)^2$  [15]. Допплерівська поправка частоти сигналу  $\Omega$   $F_d$  при двохпозиційній системі прийому та фіксованій висоті її польоту дорівнює [16]:

$$F_d = \frac{2V}{\lambda} \sin \varepsilon \sin \left( \frac{\xi}{2} \right), \quad (15)$$

де  $V$  – швидкість польоту  $\Omega$ ;  $\varepsilon$  – кут між лінією ціль – середина бази та вектором  $\bar{V}$ ;  $\xi$  – кут, який створений: I пункт прийому – ціль – II пункт прийому РМС.

При  $P_{\text{вих}}$  у 1 Гц найбільше значення 1 бокової пелюстки ТН відповідає  $F_d$ , рівному 1,5 Гц, а 6 бокових – 6,5 Гц. Коли у  $\Omega$  є  $F_d \sim 1,5$  Гц, то корельований фон, що заважає зменшується на  $\sim -13$  дБ. Вказане приводе до збільшення дальності спостереження РМС  $R1(S)$  (рис. 1, крива III, безперервна) відносно  $R(S)$ . Співвідношення  $R1(S)/R(S)$  дорівнює  $\sim 1,51$  рази. Якщо у  $\Omega$  є  $F_d$  у 6,5 Гц то рівень корельованого фону знижується до  $\sim -26$  дБ. Крива III на рис. 1 (крапки і тире) вказує на значення дальності дії  $R2(S)$  при  $F_d \sim 6,5$  Гц. Співвідношення  $R2(S)/R(S)$  дорівнює  $\sim 1,55$  рази. Не суттєве зростання даного співвідношення обумовлено значним вкладом у значення  $A$  (14) випромінювальної здатності тракту  $T_0(1-\eta)$  та коефіцієнтів шуму  $K$  каналів радіометра.

З виразу (15) визначимо найменші значення кута  $\varepsilon$  в залежності від відстані між пунктами прийому  $B$  (база) РМС та  $F_d$ , так:

$$\varepsilon = \arcsin \left\{ \frac{F_d \lambda}{2V \sin [\arctg(0,5B/R)]} \right\}. \quad (16)$$

При розрахунках (16) прийняли:  $F_{d1} = 1,5$  Гц;  $F_{d2} = 6,5$  Гц;  $V = 250$  м/с;  $R_1 = 15 \cdot 10^3$  м;  $R_2 = 1,5 \cdot 10^3$  м;  $B$  змінюється у межах від  $L1$  до  $20L1$ . Результати розрахунку представлені на рис. 2. Крива I на рис. 2  $\varepsilon(B)$  показана тире, здобута при  $F_{d1}$  і  $R_1$ . Коли  $B = L1$ , то  $\varepsilon \sim 46,1^\circ$ , хоча при

$B \approx 4,1L1$   $\varepsilon$  зменшується до  $\sim 10^\circ$ , що розширює можливості застосування РМС. Позитивний результат отримали, якщо  $R$  зменшується з  $R_1$  до  $R_2$ , при тому ж  $F_{d1}$ , крива II  $\varepsilon1(B)$ , безперервна. Так, якщо  $B = L1$ , то  $\varepsilon \sim 4,1^\circ$ . Заради зниження фону, що корельований, розглянуті величини  $\varepsilon$  при  $F_{d2}$  та  $R_1$ ,  $R_2$ . Крива III (крапки і тире) на рис. 2  $\varepsilon2(B)$  вказує, що лише при  $B \approx 18L1$  кут  $\varepsilon \geq 10^\circ$ . Останній результат є неприйнятний з точки зору технічної реалізації РМС. Крива IV на рис. 2  $\varepsilon3(B)$ , крапки, розрахована для  $F_{d2}$  і  $R_2$ , при цьому кут  $\varepsilon \geq 10^\circ$  існує вже коли  $B \approx 1,8L1$ .

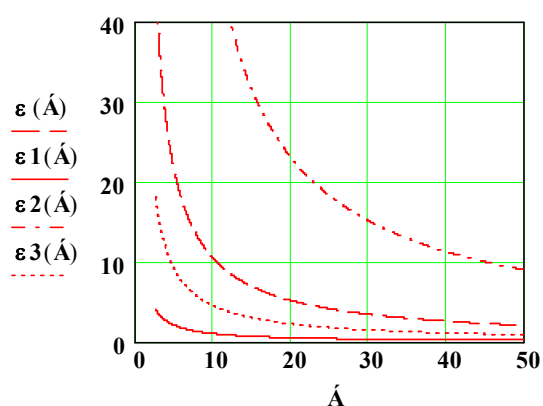


Рис. 2. Найменші значення кута  $\varepsilon$  в залежності від величини бази РМС  $B$  та значеннями доплерівської поправки частоти цілі  $F_d$

## Висновки

Таким чином, дальність радіотеплолокаційного спостереження двохпозиційною РМС порівняна з дальністю дії одноканальним радіометром потужності. Аналіз експериментально здобутого тіла невизначеності радіометричного сигналу вказав на напрямок зниження корельованого фону, що заважає. Використання доплерівської поправки частоти цілі  $\sim 1,5$  Гц (або  $\sim 6,5$  Гц) знижує вказаний кореляційний фон на  $\sim -13$  дБ ( $\sim -26$  дБ).

При цьому дальність спостереження для цілі, з площиною випромінювання у  $10$  м<sup>2</sup>, змінюється від  $\sim 13,5$  км до  $\sim 20,3$  км ( $\sim 20,9$  км), або  $\sim 1,5$  рази. Основні технічні характеристики одного з напрямків реалізації РМС наступні: розміри антен  $\sim 125$  довжин хвиль; коефіцієнт шуму  $\sim 2$ ; коефіцієнт кореляційного стискання  $\sim 10^9$ ; величина бази РМС  $\sim 4$  розміри антени.

Отриманий коефіцієнт кореляційного стискання вказує на окрему задачу негативного прийому сигналів зовні головної пелюстки діаграми спрямованості антен розглянутої системи.

## Список літератури

1. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростелев, Н.Ф. Клюев, Ю.А. Мельник и др.; Под ред. В.Е. Дулевича. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
2. Караваев В.В. Статистическая теория пассивных радиолокационных систем / В.В. Караваев, В.В. Сазонов. – М.: Радио и связь, 1987. – 240 с.
3. Qingxia Li. An Aperture Synthesis Radiometer at Millimeter Wave Band / Qingxia Li, Ke Chen, Wei Guo, Liang Lang, Fangmin He, Liangbing Chen // *Microwave and Millimeter Wave Technology*. – 2008. – ICMMT 2008. – Vol. 4. – P. 1699-1701.
4. Ji Wu. Research Activity on Synthetic Aperture Radiometry in CSSAR/CAS / Ji Wu, Hao Liu, Shouzheng Ban, Xiaolong Dong, Jingshan Jiang // *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2005*. – PIERS. – Vol. 1, No. 5. – P. 538-542.
5. Лебедев А.В. Аппаратная функция двухэлементного корреляционного радиометра с незаполненной апертурой / А.В. Лебедев, В.В. Гладун, А.В. Котов, Р.А. Павлов, Ю.А. Пирогов, Д.А. Тищенко, Чжэн Сюй-фэн // *Журнал радиоэлектроники*. – 2010. – № 8. – С. 1-14.
6. Interferometric radiometer / Edelson et al. // *United States Patent*, No: 4,990,925, Feb. 5, 1991.
7. Aperture synthesized radiometer using digital beam-forming techniques / Chang et al. // *United States Patent*, No: 5,016,018, May. 14, 1991.
8. Биков В.Н. Выявления малоразмерных объектов радиометричной информацией системой мм диапазона з шумовою підсвіткою / В.Н. Биков // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2005. – №2(10). – С. 5-11
9. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника, Том. 4. Радиолокационные станции и системы. Под ред. М.М. Вейсбена. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
10. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника, Том. 2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред. П.И. Дудника. – М.: Сов. радио, 1977. – 408 с.

11. Радиоприемные устройства / Ю.Т. Давыдов, Ю.С. Данич и др.; Под ред. А.П. Жуковского. – М.: Высш. шк., 1989. – 388 с.

12. 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.

13. Park H. Interferometric microwave radiometers for high-resolution imaging of the atmosphere brightness temperature based on the adaptive capon signal processing algorithm / H. Park, J. Choi, V. Kratkovnik, Y. Kim // *Environmental monitoring and assessment*. – Vol. 92. – P. 59-72.

14. Страшний І.Л. Кореляційний виявляч радіотеплових сигналів мало розмірних об'єктів на поверхні землі / І.Л. Страшний, В.В. Кудряшов // *IV наукова конференція ХУ ПС ім. І. Кожедуба: наук.-техн. конф.*, 16-17 квіт. 2008 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2008. – С. 186.

15. Коломійцев О.В. Дальність радіотеплолокаційного спостереження кореляційним виявлячем сигналів малорозмірних об'єктів на поверхні землі / О.В. Коломійцев, В.В. Кудряшов // *V наукова конференція ХУ ПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: наук.-техн. конф.*, 28-29 бер. 2009 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2009. – С. 217.

16. Лукін К.О. Дальність виявлення пасивним радаром із синтезованою апертурою антен / К.О. Лукін, Д.Д. Добровольський, В.В. Кудряшов // *VI наукова конференція ХУ ПС ім. І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору»: наук.-техн. конф.*, 14-15 квіт. 2010 р.: тези доп. – Х.: ХУПС, 2010. – С. 236.

17. Иванов Ю.А. Инфракрасная техника в военном деле / Ю.А. Иванов, Б.В. Тяпкин. – М.: Сов. радио, 1963. – 360 с.

Надійшла до редколегії 14.01.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Є.Л. Казаков, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ДАЛЬНОСТЬ РАДИОТЕПЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ

А.В. Коломийцев, Ю.А. Клеванный, И.В. Мельников

Предложен вариант уравнения дальности радиотеплолокационного наблюдения двухпозиционной радиометрической системой (РМС). Это позволяет обеспечить моделирование РМС в зависимости от ее технических характеристик по фиксированным малоразмерным воздушным целям. Определены направления реализации наибольшей дальности действия РМС и ее увеличения, если цель имеет доплеровскую поправку частоты. Раскрыта сущность обоснования варианта уравнения дальности. Представлены полученные аналитические выражения для расчетов и графический материал.

**Ключевые слова:** воздушная цель, коррелированный фон, дальность наблюдения радиометричной системой, доплеровская поправка частоты.

### DISTANCE OF OBSERVATIONS RADIO-HEAT RADAR BY DIP-RADIOMETRIC SYSTEM OF AIR AIMS

O.V. Kolomitsev, J.O. Klevannu, I.V. Melnikow

The variant of equalization of distance of radio warm ljcashin's supervision is offered by the twoposition aerophare system (TAS). It allows to provide the design of TAS depending on her technical descriptions on the fixed littlesize air aims. Directions of realization of most distance of action of TAS, and her increases, are certain, if an aim has the Doppler amendment of frequency. Essence of ground of variant of equalization of distance is exposed. The got analytical expressions for calculations and graphic material are presented.

**Keywords:** air aim, correlated background, distance of supervision by the radio metricsystem, Doppler amendment of frequency.