

УДК 629.7

Г.В. Худов

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ СУМІСНОГО ПОШУКУ І ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ В КОСМІЧНИХ СИСТЕМАХ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

В статті наведено методику розрахунку безумовної імовірності правильного виявлення об'єкту спостереження на виявлення об'єкту спостереження при сумісному пошуку та виявленні об'єктів у космічних системах спостереження.

**Ключові слова:** об'єкт космічного спостереження, сумісний пошук, космічна система.

### Вступ

У теперішній час космічні інформаційні системи, в тому числі і космічні системи спостереження, вирішують задачу пошуку і виявлення об'єктів спостереження в умовах обмеженого пошукового потенціалу [1 – 9].

В роботах [10 – 12] розроблено методику сумісного пошуку та виявлення об'єктів спостереження, синтезовано вирішальні правила виявлення об'єктів спостереження.

У статті розроблено методику розрахунку безумовної імовірності правильного виявлення об'єкту спостереження при сумісному пошуку та виявленні об'єктів у космічних системах спостереження.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** У роботах [10 – 12] ефективність сумісного пошуку та виявлення об'єктів спостереження оцінюється по величині ряду показників ефективності, у якості яких можуть бути обраними

$P_0(\gamma_1, t)$  – безумовна імовірність хибної тривоги;

$P_1(\gamma_1, t)$  – безумовна імовірність правильного виявлення.

– середній час до виявлення об'єкту спостереження, де  $\gamma_1$  – прийняте рішення про те, що об'єкт спостереження виявлений;

$t$  – час.

Як додаткові показники ефективності сумісного пошуку і виявлення доцільно зберегти показники, розроблені в теорії виявлення [13 – 16]:

– умовну імовірність хибної тривоги  $P(\gamma_1 / H_0, x)$ ;

– умовну імовірність правильного виявлення  $P(\gamma_1 / H_1, x)$ ,

де  $H_0$  – гіпотеза, про відсутність об'єкту у зоні огляду;

$H_1$  – гіпотеза про наявність об'єкту у зоні огляду;

$X$  – координата об'єкту.

Умовна імовірність хибної тривоги і правильного виявлення розраховується з урахуванням статистичних характеристик сигналів, що приймаються

від об'єктів спостереження [13 – 16]. Розглянемо методику розрахунку безумовної імовірності правильного виявлення об'єкту спостереження та середнього часу на виявлення об'єкту.

### Виклад основного матеріалу

Розрахунок безумовної вірогідності правильного виявлення об'єкту і середнього часу до виявлення об'єкту при одночасному пошуку і виявленні по двох координатах проведемо для випадку, коли апіорна щільність вірогідності місцеположення об'єкту задається у вигляді усіченого нормального закону [12, 14], а зона огляду є круг з радіусом  $S$ . Вважатимемо, що амплітуда сигналу, що приймається, розподілена за законом Накагамі [14].

Визначимо функцію  $\lambda(x, t)$  стратегії пошуку

$$\lambda_1(x_1, x_2; t) = \begin{cases} L_0/z(t); & \text{для } x_1^2 + x_2^2 < r^2(t); \\ 0; & \text{для } x_1^2 + x_2^2 \geq r^2(t) \end{cases}, \quad (1)$$

яка розповсюджуватиметься в крузі з центром в центрі зони огляду і поточним радіусом  $r(t)$ , де  $z(t)$  – міра поточної зони пошуку [12];  $L_0$  – пошуковий потенціал космічної системи.

Це відбуватиметься до тих пір, поки область розповсюдження стратегії пошуку не стане рівної розмірам зони огляду.

Визначимо цей момент часу  $t_1$  з умови рівності розмірів поточної зони огляду розмірам всієї зони огляду. Отримаємо

$$\sigma\sqrt{2\pi L_0 t} = \pi S^2,$$

де  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення у апіорному закону місцеположення об'єкту, звідки

$$t_1 = \frac{\pi S^4}{4\sigma^2 L_0}. \quad (2)$$

В точках зони огляду, де розповсюджується стратегія пошуку, за час  $[0, t_1]$  буде накопичено пошуковий потенціал, пропорційний параметру виявлення, який може бути обчислений згідно виразу

$$\varphi_1 = \int_{t(x_1, x_2)}^{t_1} \lambda(x_1, x_2) dx, \quad (3)$$

де  $t(x_1, x_2)$  – функція, що має значення часу початку огляду точок зони огляду.

Знайдемо цю функцію з умови

$$x_1^2 + x_2^2 = 2\sigma\sqrt{\frac{L_0 t(x_1, x_2)}{\pi}},$$

звідки

$$t(x_1, x_2) = \frac{\pi(x_1^2 + x_2^2)^2}{4\sigma^2 L_0}. \quad (4)$$

Підставляючи (1), (2) і (4) в (3), беручи інтеграл (3), одержуємо

$$\varphi_1(x_1, x_2) = \begin{cases} \frac{S^2 - x_1^2 - x_2^2}{2\sigma^2}; & \text{для } x_1^2 + x_2^2 < S^2; \\ 0; & \text{для } x_1^2 + x_2^2 \geq S^2. \end{cases} \quad (5)$$

Для знаходження функції  $\varphi_1(x_1, x_2)$  на будь-який момент часу замінимо в (3) верхню межу інтеграції на поточний час  $t$

$$\varphi_1(x_1, x_2) = \int_{t(x_1, x_2)}^t \lambda_1(x_1, x_2; t) dt. \quad (6)$$

Після моменту  $t_1$  при прийнятій щільності априорної вірогідності стратегія пошуку розповсюджуватиметься в умовах рівномірної щільності розподілу – «п'єдесталу». При цьому поточна зона огляду  $\Omega(t)$  повністю співпадатиме зі всією зоною огляду, і

$$\Omega(t) = \pi S^2. \quad (7)$$

Стратегія пошуку при цьому з урахуванням (7) має вигляд

$$\lambda_2(x_1, x_2; t) = \begin{cases} \frac{L_0}{\pi S^2}; & \text{для } x_1^2 + x_2^2 < S^2; \\ 0; & \text{для } x_1^2 + x_2^2 \geq S^2. \end{cases} \quad (8)$$

В проміжку часу  $[t_1, T]$  пошуковий потенціал з урахуванням (8) може бути визначений згідно виразу

$$P_1(\gamma_1, T) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{h^2}{2}}} \int_0^h \left(1 + \frac{\frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}}{\left(1 + \frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}\right)^2}\right) \ln\left(\frac{1}{F}\right) \exp\left(-\frac{\ln\left(\frac{1}{F}\right)}{1 + \frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}} - \frac{\rho_1^2}{2}\right) \rho_1 d\rho_1 \quad (13)$$

Залежність безумовної вірогідності правильного виявлення, розрахована згідно виразам (12), (13), від величини, що характеризує швидкість і час огляду всієї зони огляду, представлені на рис. 1, 2.

Мінімальне значення величини, пропорційної значенню загального пошукового потенціалу системи спостереження, вибирається з умови обов'язкового перегляду всієї зони огляду, тобто, звідки  $k \geq \pi h^4 / 4$ .

$$\varphi_2(x_1, x_2) = \int_{t_1}^T \lambda_2(x_1, x_2; t) dt. \quad (9)$$

Підставляючи (8), (2) в (9), маємо

$$\varphi_2(x_1, x_2) = \frac{L_0(T - t_1)}{\pi S^2}, \quad (10)$$

де  $T$  – час, що відводиться на огляд всієї зони огляду.

Враховуючи прямо пропорційну залежність параметра виявлення і розрахованого значення пошукового потенціалу, розрахуємо безумовну вірогідність правильного виявлення об'єкту за час пошуку  $T$  при безперервному пошуку об'єкту по двох координатах в круговій зоні огляду. При цьому обмежимося випадком виявлення радіолокації сигналу з амплітудою, розподіленою за законом Накагамі [14]. Для зручності подальших розрахунків введемо полярну систему координат. Тоді вирази (1) і (8) для стратегії пошуку з урахуванням переходу до полярної системи координат і переходу в обох частинах до безрозмірних величин шляхом домноження на час пошуку мають вигляд

$$\lambda(\rho_1, \beta, s) T = \begin{cases} \frac{k^{1/2}}{2(\pi s)^{1/2}}; & s \in [0, s_1] \\ \frac{k}{\pi h^2}; & s \in [s_1, 1] \end{cases}, \quad \rho_1 < h; \quad 0 \leq \beta \leq 360^\circ,$$

а для пошукового потенціалу при зміні величини  $s$  в інтервалі виразу (5), (6) перетворяться до вигляду

$$\varphi(\rho_1, \beta) = \frac{h^2}{4} + \frac{k}{\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{2}; \quad \rho_1 < h; \quad 0 \leq \beta \leq 360^\circ. \quad (11)$$

Таким чином, вирази для безумовної вірогідності правильного виявлення об'єкту спостереження:

для  $m = 1$

$$P_1(\gamma_1, T) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{h^2}{2}}} \int_0^h \exp\left(-\frac{\ln(1/F)}{1 + \frac{h^2}{4} + \frac{k^2}{\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{2}} - \frac{\rho_1^2}{2}\right) \rho_1 d\rho_1 \quad (12)$$

для  $m = 2$

$$P_1(\gamma_1, T) = \frac{1}{1 - e^{-\frac{h^2}{2}}} \int_0^h \left(1 + \frac{\frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}}{\left(1 + \frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}\right)^2}\right) \ln\left(\frac{1}{F}\right) \exp\left(-\frac{\ln\left(\frac{1}{F}\right)}{1 + \frac{h^2}{8} + \frac{k^2}{2\pi h^2} - \frac{\rho_1^2}{4}} - \frac{\rho_1^2}{2}\right) \rho_1 d\rho_1 \quad (13)$$

На графіках, зображених на рис. 1, 2, представлена залежність безумовної ймовірності правильного виявлення від величини  $k$  при значеннях умовної вірогідності хибної тривоги  $F = 10^{-2}$  (верхня крива) і (нижня крива  $F = 10^{-4}$ ).

При цьому графіки, зображені на рис. 1, 2, розраховувалися за таких умов:

рис. 1 –  $m = 1, h = 1$ ; рис. 2 –  $m = 2, h = 1$ .

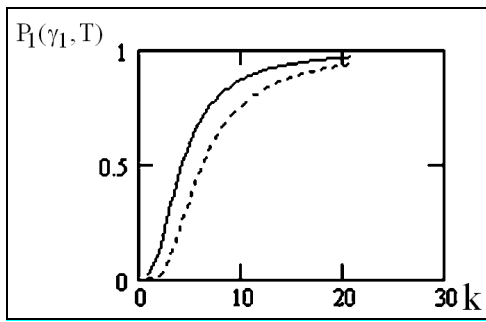


Рис. 1. Залежність безумовної імовірності правильного виявлення від величини k при  $F = 10^{-2}$  (верхня крива),  $F = 10^{-4}$  (нижня крива) ( $m = 1, h = 1$ )

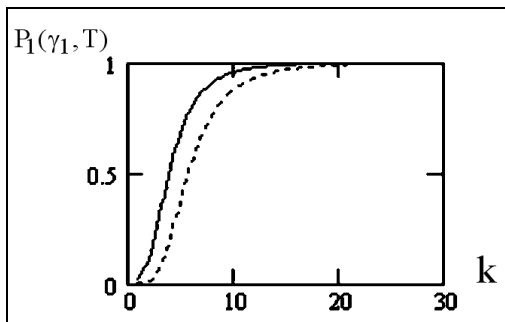


Рис. 2. Залежність безумовної імовірності правильного виявлення від величини k при  $F = 10^{-2}$  (верхня крива),  $F = 10^{-4}$  (нижня крива) ( $m = 2, h = 1$ )

Для оцінки ефективності алгоритму пошуку і виявлення об'єкту з використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку проведемо порівняння цього алгоритму з відомими алгоритмами просторово-часового розподілу пошукових зусиль в системах спостереження, що припускають рівномірний розподіл пошукового потенціалу по зоні огляду. При рівномірному розподілі вираз для параметра виявлення, а, отже, для пошукового потенціалу має вигляд

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{L_0 T}{\pi S^2},$$

яке з урахуванням введених позначень має вигляд

$$\varphi(x_1, x_2) = \frac{k}{\pi h^2}. \tag{14}$$

Вирази для умовної імовірності правильного виявлення об'єкту спостереження при рівномірному розподілі пошукового потенціалу по зоні пошуку з урахуванням (14) мають вигляд:

для  $m = 1$

$$P_1(\gamma_1 / H_1, x_1, x_2) = F \frac{1}{1 + \frac{k}{\pi h^2}}, \tag{15}$$

для  $m = 2$

$$P_1(\gamma_1 / H_1, x_1, x_2) = \left(1 + \frac{k}{2\pi h^2 \left(1 + \frac{k}{2\pi h^2}\right)^2} \ln\left(\frac{1}{F}\right)\right) F^{\frac{1}{1 + \frac{k}{2\pi h^2}}}. \tag{16}$$

Безумовну імовірність правильного виявлення об'єкту при рівномірному розподілі пошукового потенціалу по зоні огляду отримаємо, використовуючи вирази (15), (16). Використовуючи введені раніше позначення:

для  $m = 1$

$$P_1(\gamma_1, T) = \frac{1}{F \frac{1}{1 + \frac{k}{\pi h^2}} h} \int_0^h \exp\left(-\frac{\rho_1^2}{2}\right) \rho_1 d\rho_1, \tag{17}$$

для  $m = 2$

$$P_1(\gamma_1, T) = \frac{1}{F \frac{1}{1 + \frac{k}{2\pi h^2}} \left(1 + \frac{k \ln\left(\frac{1}{F}\right)}{2\pi h^2 \left(1 + \frac{k}{2\pi h^2}\right)^2}\right) h} \int_0^h \exp\left(-\frac{\rho_1^2}{2}\right) \rho_1 d\rho_1. \tag{18}$$

На рис. 3, 4 представлені графіки залежності безумовної імовірності виявлення об'єкту при рівномірному розподілі пошукового потенціалу по зоні огляду (нижня крива), розраховані згідно виразам (17) і (18) і при сумісному пошуку і виявленні об'єкту (верхня крива), розраховані згідно виразам (12), (13), від величини k.

При цьому графіки, зображені на рис. 3, 4, розраховані за умов:

рис. 3 –  $m = 1, h = 1$ ; рис. 4 –  $m = 2, h = 1$ ,

значення умовної імовірності хибної тривоги приймалося рівним  $F = 10^{-3}$ .

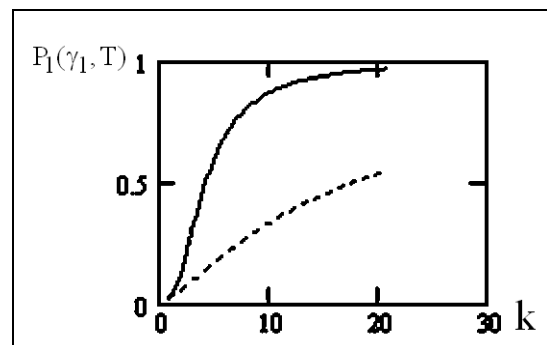


Рис. 3. Залежність безумовної імовірності правильного виявлення від величини k при рівномірному розподілі пошукового потенціалу (нижня крива) і при сумісному пошуку і виявленні об'єкту (верхня крива) ( $m = 1, h = 1$ )

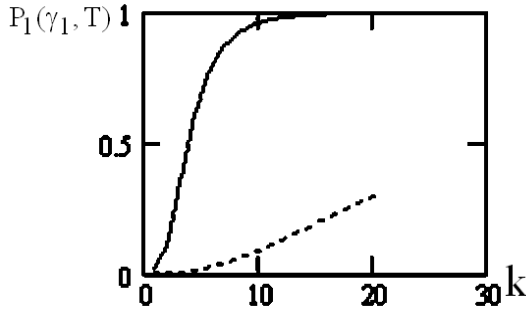


Рис. 4. Залежність безумовної імовірності правильного виявлення від величини  $k$  при рівномірному розподілі пошукового потенціалу (нижня крива) і при сумісному пошуку і виявленні об'єкта (верхня крива) ( $m = 2, h = 1$ )

З приведених графіків видно, що сумісний пошук і виявлення об'єкту спостереження з використанням рівномірно-оптимальної стратегії пошуку забезпечує більш високу безумовну імовірність правильного виявлення об'єкту спостереження. Це особливо помітно за умови жорсткого обмеження на величину  $k$ .

### Висновки та напрямки подальших досліджень

Таким чином, у статті наведено методику розрахунку безумовної імовірності правильного виявлення об'єкту спостереження при сумісному пошуку та виявленні об'єктів у космічних системах спостереження. У подальших дослідженнях необхідно провести оцінку середнього часу на виявлення об'єкту спостереження при сумісному пошуку та виявленні об'єктів та рівномірному розподілу пошукового потенціалу космічних систем спостереження.

### Список літератури

1. Гонин Г.Б. Космические съемки Земли / Г.Б. Гонин. – М.: Недра, 1989. – 252 с.
2. Гиммельфарб Г.Л. Автоматизированная межотраслевая обработка снимков земной поверхности с ИСЗ серии «Landsat» / Г.Л. Гиммельфарб // ЗРЭ. – 1983. – № 8. – С. 56-84.
3. Лялько В.І. Використання космічної інформації у вирішенні водогосподарських і водоохоронних завдань /

В.І. Лялько, О.Д. Федоровський // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3. – № 3/4. – С. 49-62.

4. Радиолокация поверхности Земли из космоса / под ред. Л.М. Митника, С.В. Викторова. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.

5. Сазонов Н.А. Алгоритм формирования радиолокационного изображения в авиационно – космической двухпозиционной РСА / Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин, М.М. Ярушкин // Радиотехника. – 2000. – № 4. – С. 71-77.

6. Андронов А. Американские космические системы видовой разведки / А. Андронов, Р. Шевров // ЗВО. – 1995. – № 2. – С. 39-42.

7. Андронов А. Американские космические системы видовой разведки / А. Андронов, Р. Шевров // ЗВО. – 1995. – № 3. – С. 37-44.

8. Аерокосмічна розвідка в локальних війнах сучасності. Досвід, проблемні питання і тенденції / Л.М. Артюшин, С.П. Мосов, Д.В. П'яковський, В.Б. Толубко. – К.: НАОУ, ЖВІРЕ, 2002. – 207 с.

9. Дешифрирование космических снимков и распознавание ландшафтных зон на основе структурного анализа / А.Д. Федоровский, В.Г. Якимчук и др. // Космічна наука і технологія. – 2000. – Т. 6, № 2/3. – С. 39-45.

10. Голкин Д.В. Особенности оптимизации многоальтернативных решений при совместном поиске и проверке гипотез о состоянии объекта наблюдения / Д.В. Голкин, Г.В. Худов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – № 4. – С. 4-7.

11. Худов Г.В. Особенности оптимизации двухальтернативных решений при совместном поиске и обнаружении объектов / Г.В. Худов // Проблемы управления и информатики. – 2003. – № 5. – С. 51-59.

12. Голкин Д.В. Совместная байесовская оптимизация поиска и обнаружения объектов в радиолокационных системах / Д.В. Голкин, Г.В. Худов. – Успехи современной радиоэлектроники. – 2003. – № 11. – С. 23-32.

13. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – Х.: ВИРТА ПВО, 1984. – 410 с.

14. 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.

15. Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов / Ю.Г. Сосулин. – М.: Сов. Радио, 1978. – 320 с.

16. Питерсон У. Теория обнаружения сигналов // Теория информации и ее приложения: пер. с англ. / У. Питерсон, Т. Бердсал, У. Фокс; под ред. А.А. Харкевича. – М.: Физматгиз, 1959. – 328 с.

Надійшла до редколегії 5.10.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТИМОГО ПОИСКА И ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ

Г.В. Худов

В статье приведена методика расчета безусловной вероятности правильного выявления объекта наблюдения на выявление объекта наблюдения при совместном поиске и выявлении объектов в космических системах наблюдения.

**Ключевые слова:** объект космического наблюдения, совместимый поиск, космическая система.

### A METHOD OF ESTIMATION OF EFFICIENCY OF COMPATIBLE SEARCH AND EXPOSURE OF OBJECTS IS IN SPACE SYSTEMS OF SUPERVISION

G.V. Khudov

In the article the method of calculation of absolute probability of correct exposure of object of supervision on the exposure of object of supervision is resulted at a compatible search and exposure of objects in the space systems of supervision.

**Keywords:** object of space supervision, compatible search, space system.