

Р.Г. Сидоренко, Г.В. Акулінін, С.А. Безверхий, А.А. Гончаров

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАХОДІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ВІД РАДІОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ВІЯВЛЕННЯ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

Проведено оцінку можливостей розвідки об'єктів апаратурою радіотеплової розвідки, яка встановлена на космічних апаратах, літаках-розвідниках та безпілотних літальних апаратах. Наведенні необхідні для розрахунків вихідні дані по об'єктах та умовах ведення розвідки. Отримано аналітичні вирази для розрахунку співвідношення сигнал/шум, що сприймається оком оператора на радіотепловому зображенні та ефективності зниження радіотеплової помітності об'єктів при їх захисті за допомогою розсіюючих та поглинаючих покриттів. Розроблено математичний апарат для оцінки ефективності зниження радіотеплової помітності об'єктів за рахунок використання розсіюючих та поглинаючих покриттів.

Ключові слова: *зниження помітності об'єктів, розсіюючі та поглинаючі покриття, засоби розвідки радіоелектронний захист.*

Вступ

Сучасні засоби розвідки об'єктів з радіотепловою апаратурою, яка встановлена на космічних апаратах, літаках-розвідниках та безпілотних літальних апаратах (БПЛА) дозволяють здійснювати виявлення, різних об'єктів озброєння та військової техніки (ОВТ) на значній відстані від лінії зіткнення конфліктуючих сторін. Це досягається застосуванням радіометричних систем виявлення сантиметрового (СМ) і міліметрового (ММ) діапазонів довжин хвиль (ДВ), що володіють порівняно найбільшою дальністю дії, високою роздільною здатністю, незалежністю функціонування від характеру оперативного-тактичної обстановки і погодно-кліматичних умов, а також абсолютної скритності через пасивне визначення цілі [1–4].

В зазначених системах зображення поверхні землі формується шляхом реєстрації просторового розподілення інтенсивності радіотеплового випромінювання підстилаючої поверхні за допомогою радіометричного приймача і антенного пристрою, що забезпечують з високою роздільною здатністю визначення розташування елемента поверхні. Роздільна здатність забезпечується відповідними шириною діаграми спрямованості антенного пристрою і чутливістю радіометричного приймача. При цьому можливі або паралельний, або послідовний огляд місцевості (за допомогою багатоканального або одно-канального приймача).

Тому для надійного радіоелектронного захисту об'єктів в зазначеному частотному діапазоні необхідно приймати заходи щодо зниження помітності.

Можливим варіантом таких заходів є використання спеціальних засобів на основі розсіюючих та поглинаючих покриттів (РПП).

Постановка проблеми. Одним з найбільш значущих чинників підвищення бойової ефективності об'єктів ОВТ, що особливо активно використовуються в нових технологіях, є засоби зниження радіолокаційної та радіотеплової помітності на основі спеціальних покриттів і матеріалів, що призводять до істотного зниження дальності та імовірності виявлення та ідентифікації об'єктів ОВТ.

Однак, з огляду на важливість вирішення проблеми радіоелектронного захисту об'єктів ОВТ від засобів розвідки з радіотепловою апаратурою СМ і ММ ДВ, застосування РПП для забезпечення необхідної радіотеплової помітності об'єктів повинно мати відповідне наукове обґрунтування і спиратися на прогноз очікуваних результатів, що обумовлює необхідність проведення подальших досліджень, спрямованих, насамперед, на розвиток теорії і практики оцінки застосування РПП і розробку практичних рекомендацій щодо захисту об'єктів ОВТ від зазначеної апаратури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням зниження помітності об'єктів за рахунок використання спеціальних покриттів в останній час приділяється багато уваги. В роботах [5–8] розглянуті основні напрямки створення розсіюючих та поглинаючих покриттів, а також методи зниження ефективності застосування засобів виявлення та ураження за рахунок використання зазначених покриттів.

Однак оцінок ефективності застосування для захисту об'єктів в реальній обстановці розсіюючих та поглинаючих покриттів не проведено та не розроблений математичний апарат для цих цілей.

Мета статті – розробка математичного апарату для оцінки ефективності заходів радіоелектронного

захисту об'єктів від радіометричних систем виявлення (апаратури радіотеплової розвідки) за рахунок використання спеціальних покриттів.

Виклад основного матеріалу

Проведемо оцінку можливостей розвідки об'єктів апаратурою радіотеплової розвідки, яка встановлена на космічних апаратах, літаках-розвідниках та БПЛА.

Для оцінки можливостей радіотеплової розвідки об'єктів будемо використовувати такий показник, як імовірність виявлення об'єкта – P_m .

Для визначення наведеного показника необхідні наступні вихідні дані:

– по апаратурі розвідки:

1) робоча довжина хвилі λ_x , м;

2) ширина смуги пропускання височастотної частини приймача Δf , Гц;

3) температурна чутливість приймача (приведена до часу спостереження сигналу $t_c=1$ с) δT , К;

4) діаметр антени d_a , м;

5) сектор обзору φ_0 , град;

6) спосіб обзору (конічне сканування діаграмою спрямованості антени, огляд віяловою діаграмою спрямованості);

7) кут сканування (візування) Ψ_m , град;

– по об'єкту розвідки:

1) середня температура об'єкта T_0 , К;

2) спектральний коефіцієнт випромінювання об'єкта ε_0 ;

3) спектральний коефіцієнт відбиття об'єкта ρ_0 ;

4) довжина та ширина об'єкта $l_o, l_{ш}$, м;

– по умовам ведення розвідки:

1) середня температура фону T_f , К;

2) спектральний коефіцієнт випромінювання фону ε_f ;

3) спектральний коефіцієнт відбиття фону ρ_f ;

4) середня температура повітря у земній поверхні T_p , К;

5) коефіцієнт згасання радіохвиль в атмосфері γ , дБ км⁻¹;

6) товщина шару гідрометеорів Δh_z , м;

7) коефіцієнт згасання радіохвиль в гідрометеорах γ_z , дБ км⁻¹;

8) лінійна швидкість носія апаратури розвідки v , м с⁻¹;

9) висота польоту носія апаратури розвідки h_n , м.

Необхідні для розрахунків вихідні дані по об'єктам та умовам ведення розвідки наведені в табл. 1–5 [9–11].

При цьому товщина шару дощу Δh_z береться в границях $(1-2) 10^3$ м. Згасання радіохвиль у сухому снігу навіть при інтенсивних снігопадах (125 мм/год) дуже незначне. Значення γ_z у мокрому снігу в 2,5 разу більше ніж у дощі такої ж інтенсивності.

При розрахунках імовірності виявлення об'єктів P_m приймемо допущення про оптимальну за критерієм Неймана-Пірсона обробку радіотеплових сигналів апаратурою розвідки [12].

Таблиця 1

Спектральні коефіцієнти випромінювання та відбиття матеріалів (фонів) ε_0 (ε_f), ρ_0 (ρ_f) в діапазоні

довжин хвиль 0,13–4,5 см.

Матеріал	Спектральний коефіцієнт випромінювання ε_0 (ε_f)	Спектральний коефіцієнт відбиття ρ_0 (ρ_f)
Водна поверхня	0,41-0,50	0,50-0,59
Трав'яний покрив	0,98-0,99	0,01-0,02
Бетонована поверхня	0,88-0,94	0,06-0,12
Асфальтована поверхня	0,89-0,95	0,05-0,11
Металічні конструкції	0,10-0,16	0,84-0,90

Таблиця 2

Коефіцієнт згасання радіохвиль в атмосфері γ , дБ км⁻¹

Час року	Значення γ на довжинах хвиль, см				
	0,13	0,32	0,82	1,4	3,0
Літо	1	0,1	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Осінь	0,6	0,1	$4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Весна	0,4	0,08	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Зима	0,2	0,04	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$0,8 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3

Коефіцієнт згасання радіохвиль в хмарах γ_z , дБ км⁻¹

Вид хмар	Значення γ_z на довжинах хвиль, см				
	0,13	0,32	0,82	1,4	3,0
Шарувато-купчасті $\Delta h_r=500$	3,9	0,64	0,1	$3,35 \cdot 10^{-2}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$

Таблиця 3
Коефіцієнт згасання радіохвиль в хмарах γ_z , дБ км⁻¹

Вид хмар	Значення γ_z на довжинах хвиль, см				
	0,13	0,32	0,82	1,4	3,0
Шарувато-дошові $\Delta h_r=1000$	5,2	0,85	0,13	$4,47 \cdot 10^{-2}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$
Купчасто-дошові $\Delta h_r=2000$	26	4,25	0,65	0,22	$4,85 \cdot 10^{-2}$

Таблиця 4
Коефіцієнт згасання радіохвиль в дощі γ_z , дБ км⁻¹

Інтенсивність дощу, мм/год	Значення γ_z на довжинах хвиль, см				
	0,13	0,32	0,82	1,4	3,0
0,25 – мжичка	0,3	0,17	0,07	0,02	0,02
1 – слабкий	0,8	0,6	0,25	0,2	0,15
4 – помірний	3,8	3	1	0,5	0,25
16 – сильний	10	8	4	2	0,9

Таблиця 5
Основні характеристики приладів для вимірювання температури повітря, фонів та об'єктів

Прилад	Призначення	Границі вимірювань, °С	Похибка вимірювань
Термометр опору ТСП-309	Вимір різних температурних поверхонь	0-120	2%
Термометр термоелектричний ТХА-1479	Вимір різних температурних поверхонь	0-400 0-750	1°С
Термометр термоелектричний КК-0665	Вимір температури води	0-350	0,5°С
Термометр ТМ-3	Вимір температури поверхні ґрунту	-35-+60 -25-+760 -10-+85	0,5°С
Термометр ТМ-10	Вимір температури різних глибинних шарів ґрунту та поверхонь шару води у водоймищах	Для ґрунту: -20-+30 -10-+40 для води: -5-+40	0,2°С

Імовірність виявлення об'єкта $P_{т1}$, без використання РПП, апаратурою радіотеплової розвідки визначається згідно графіку [12], який зображений на рис. 1 в залежності від величини співвідношення сигнал/шум, яка розраховується за формулою:

$$q_1 = 0,5 \sqrt{N_{i1}} \frac{|\Delta T_{a1}|}{T_{a1} + T_{ш}} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F_1}}, \quad (1)$$

де N_{i1} – коефіцієнт, що враховує здатність ока оператора (дешифрувальника) виконувати просторове інтегрування по полю радіотеплового зображення об'єкта;

ΔT_{a1} – контраст антенних температур без застосування РПП, що обумовлений радіотепловим контрастом об'єкта з фоном, К;

T_{a1} – середнє значення антенних температур без застосування РПП, К;

ΔF_1 – вихідна полоса пропускання апаратури радіотеплової розвідки, Гц;

$T_{ш} = \delta T \sqrt{\Delta f t_c}$ – шумова температура апаратури радіотеплової розвідки, К.

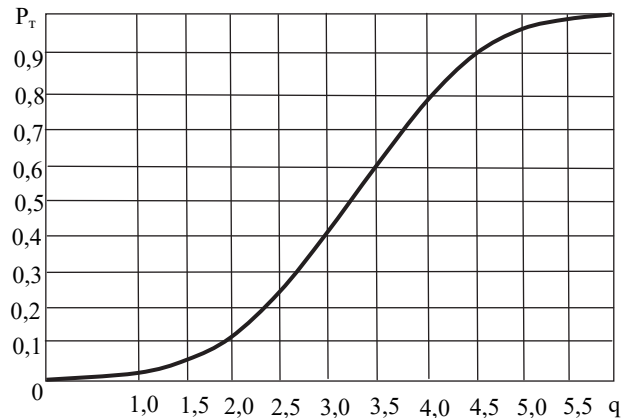


Рис. 1. Залежність імовірності виявлення об'єкта P_m від співвідношення сигнал/шум q

Коефіцієнт N_{i1} розраховується за формулою:

$$N_{i1} = \begin{cases} 1 \text{ при } l_\delta, l_{ш} < \Delta l_{m1}; \\ \frac{l_\delta l_{ш}}{\Delta l_{m1}^2} \text{ при } \Delta l_{m1} \leq l_\delta, l_{ш} \leq 13 \Delta l_{m1}; \\ 13 \text{ при } l_\delta \geq 13 \Delta l_{m1}, l_{ш} < \Delta l_{m1}; \\ \frac{13 l_{ш}}{\Delta l_{m1}} \text{ при } l_\delta > 13 \Delta l_{m1}, \Delta l_{m1} \leq l_{ш} \leq 13 \Delta l_{m1}; \\ \frac{l_\delta}{\Delta l_{m1}} \text{ при } \Delta l_{m1} \leq l_\delta \leq 13 \Delta l_{m1}, l_{ш} < \Delta l_{m1}; \\ 170 \text{ при } l_\delta, l_{ш} \geq 13 \Delta l_{m1}, \end{cases} \quad (2)$$

де Δl_{m1} – роздільна здатність апаратури розвідки на місцевості, м, яка визначається за формулою:

$$\Delta l_{m1} = \begin{cases} \frac{h_n \lambda_x}{\sqrt{S_A}}; \\ \frac{h_n \lambda_x}{\cos \Psi_m \sqrt{S_A}}, \end{cases} \quad (3)$$

– перший випадок для апаратури радіотеплової космічної розвідки зі способом обзору віялової діаграми спрямованості антени (ДСА);

– другий для апаратури радіотеплової повітряної розвідки зі способом обзору кінчним скануванням ДСА;

$$S_A \approx \frac{0,7\pi d_a^2}{4} - \text{ефективна площа антени, м}^2.$$

Контраст антенних температур та їх середнє значення визначаються за формулами:

$$\Delta T_{a1} = n_a (T_{zo} - T_{z\phi}) \tau; \quad (4)$$

$$T_{a1} = \left[\left(1 - \frac{n_a}{2} \right) T_{z\phi} + \frac{n_a}{2} T_{zo} \right] \tau + T_y, \quad (5)$$

де $T_{zo} = \varepsilon_0 T_0 + \rho_0 T_y$ – здаваема температура об'єкта без застосування розсіюючих та поглинаючих покриттів, К;

$T_{z\phi} = \varepsilon_\phi T_\phi + \rho_\phi T_y$ – здаваема температура фону, К;

$T_y = (T_n - 30) \cdot (1 - \tau)$ – яскрава температура атмосфери, К;

$T_n = \exp\left\{-2,3 \cdot 10^{-4} (\gamma D_{an} + \gamma_z D_z)\right\}$ – прозорість атмосфери;

D_{an} – приведена дальність розповсюдження радіохвиль в атмосфері від об'єкта до апаратури розвідки m , яка визначається за формулою:

$$D_{an} = \begin{cases} 14,1 \cdot 10^3; \\ \frac{h_n}{\cos \Psi_m}, \end{cases} \quad (6)$$

– перший випадок для апаратури радіотеплової космічної розвідки зі способом обзору віялової ДСА;

– другий для апаратури радіотеплової повітряної розвідки зі способом обзору кінчним скануванням ДСА;

D_z – дальність розповсюдження радіохвиль в гідрометеорах від об'єкту до апаратури розвідки, м, яка визначається за формулою:

$$D_z = \begin{cases} \Delta h_z; \\ \frac{\Delta h_z}{\cos \Psi_m}, \end{cases} \quad (7)$$

де n_a – коефіцієнт, що показує яку частину елемента розділу апаратури розвідки на місцевості займає об'єкт, який розраховується за формулою:

$$n_a = \begin{cases} \frac{l_u l_\delta}{\Delta l_{m1}^2}, & \text{при } l_\delta < \Delta l_{m1}, l_u < \Delta l_{m1}; \\ \frac{l_u}{\Delta l_{m1}}, & \text{при } l_\delta > \Delta l_{m1}, l_u < \Delta l_{m1}; \\ 1, & \text{при } l_\delta, l_u \geq \Delta l_{m1}. \end{cases} \quad (8)$$

Вихідна смуга пропускання апаратури розвідки ΔF_1 розраховується за формулою:

$$\Delta F_1 = \begin{cases} \frac{2\nu S_A \Phi_0 \cos^2 \Psi_m}{57,3 h_n \lambda_x^2}; \\ \frac{\nu \sqrt{S_A}}{h_n \lambda_x}, \end{cases} \quad (9)$$

перший випадок при способі обзору кінчним скануванням ДСА;

другий при способі обзору віяловим скануванням ДСА.

Співвідношення сигнал/шум, що сприймається оком оператора (дешифрувальника) радіотеплового зображення об'єкта при використанні РПП, розраховується по формулі:

$$q_2 = 0,5 \sqrt{N_{i1}} \frac{|\Delta T_{a2}|}{T_{a2} + T_u} \sqrt{\frac{\Delta f}{\Delta F_1}}. \quad (10)$$

Контраст антенних температур при використанні РПП та їх середнє значення визначаються за формулами:

$$\Delta T_{a2} = n_a (T_{zn} - T_{z\phi}) \tau; \quad (11)$$

$$T_{a2} = \left[\left(1 - \frac{n_a}{2} \right) T_{z\phi} + \frac{n_a}{2} T_{zn} \right] \tau + T_y, \quad (12)$$

де $T_{zn} = \varepsilon_n T_0 + \rho_n T_y$ – здаваема температура об'єкта при використанні РПП, К;

ε_n – спектральний коефіцієнт випромінювання об'єкта при використанні РПП;

ρ_n – спектральний коефіцієнт відбиття об'єкта при використанні РПП.

Згідно графіка зображеного на рис. 1 визначаються значення імовірності виявлення об'єктів апаратурою радіотеплової розвідки без РПП P_{r1} та з використанням розсіюючих та поглинаючих покриттів P_{r2} .

Ефективність зниження радіотеплової помітності об'єктів за рахунок використання РПП оцінюється за формулою:

$$E_{pt} = (P_{m1} - P_{m2}) \cdot 100\%. \quad (13)$$

Висновки

Отже розроблено математичний апарат для оцінки ефективності заходів радіоелектронного захисту об'єктів від радіометричних систем виявлення за рахунок використання спеціальних покриттів. Для цього в наступній послідовності визначаються:

– вихідні дані по апаратурі розвідки: $\lambda_x, \Delta f, \delta T, d_a, \Phi_0, \Psi_M$;
 – вихідні дані по об'єктам та умовам ведення розвідки: $T_0, \varepsilon_0, \rho_0, l_o, l_{ш}, T_{\phi}, \varepsilon_{\phi}, \rho_{\phi}, T_n, K, \gamma, \Delta h_{\Gamma}, \gamma_{\Gamma}, \nu, h_n$. При цьому середнє значення температур об'єкта T_0 , фону T_{ϕ} , повітря T_n визначається експериментально. За допомогою термометрів (табл. 5) вимірюються у відповідності з інструкціями по їх експлуатації значення температур повітря T_{ni} і фону $T_{\phi i}$ в декількох точках біля об'єкту та температури T_{0i} окремих різних по нагріву ділянок об'єкту. Після усереднення результатів вимірювання отримуємо середні значення температур повітря, фону і об'єкту T_n, T_{ϕ}, T_0 ;

– величини $N_{i1}, \Delta F_1$ за формулами (2, 9);
 – величини $\Delta T_{a1}, T_{a1}, \Delta T_{a2}, T_{a2}$ за формулами (4, 5, 11, 12);
 – величини q_1 та q_2 за формулами (1, 10);
 – величини P_{m1} та P_{m2} згідно графіка зображеного на рис. 1;
 – величина ефективності зниження радіотеплової помітності об'єктів за рахунок використання спеціальних покриттів E_{pm} за формулою (13).
 Таким чином розроблена методика дозволить оцінити зниження помітності ОБТ від радіометричних систем виявлення для практичного визначення ефективності застосування спеціальних покриттів.

Список літератури

1. Слипченко В.И. Анализ военной кампании НАТО против Югославии весной 1999 г. / В.И. Слипченко // Экспорт вооружений. – 2000. – № 3. – С. 4-12.
2. Гурский Б. Системы наведения ракет класса “земля-земля” – основа дальнего огневого поражения наземных целей / Б. Гурский, А. Свободин // Высокоточное оружие. – 2003. – С. 24-26.
3. Zweibaum F. Radiometry and military / F. Zweibaum // Photonics Spectra. – 1986. – V. 20. – № 8. – P. 113-116.
4. Савенков А. Разработка высокоточных всепогодных систем наведения малоразмерных средств поражения объектов ВВТ / А. Савенков // Оборонная техника. – 1990. – № 9. – С. 18-19.
5. Сотников А.М. Модель противодействия управляемым средствам поражения с радиометрическими головками самонаведения / А.М. Сотников, А.Б. Гаврилов // Системы обработки інформації. – 2004. – № 11(39). – С. 185-190.
6. Умение быть невидимым. Конструкция “Контраст КМС” – квинтэссенция маскировочного искусства // Defense Express. – 2004. – № 12(37).
7. Сотников А.М. Метод снижения радиометрической наблюдаемости наземных малоразмерных объектов / А.М. Сотников, И.В. Красношапка, А.Б. Гаврилов // Системы обработки інформації. – 2005. – № 1(41). – С. 169-172.
8. Оцінка ефективності зниження радіолокаційної помітності об'єктів за рахунок використання розсіюючих та поглинаючих покриттів / Р.Г. Сидоренко, В.І. Грідін, А.І. Резніченко, О.В. Філіппенков // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – № 1(53). – С. 189-194. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.53.27>.
9. Бетяев Ю. Радиопоглощающие материалы и технология “Стелс” / Ю. Бетяев // Зарубежное военное обозрение. – 1988. – № 6. – С. 45-46.
10. Антюфеев В.И. Применение принципов радиометрии в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов по наземным ориентирам / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков, Б.И. Макаренко // Арсенал XXI сторіччя. – 2002. – № 1. – С. 37-41.
11. Сидоренко Р.Г. Пасивні засоби радіоелектронного захисту об'єктів від впливу сучасних та перспективних засобів ураження / Р.Г. Сидоренко, Г.В. Акулінін, О.О. Скопінцев // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 1(26). – С. 156-159. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.31>.
12. Беркович Р. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем / Р. Беркович; пер. с англ.; под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М: Книга по требованию, 1968. – 700 с.

References

1. Slipchenko, V.I. (1999), “Analiz voyennoy kampanii NATO protiv Yugoslavii vesnoy 1999” [Analysis of the military campaign of NATO against Yugoslavia in the spring of 1999], *Arms Exports*, No. 3, pp. 4-12.
2. Gursky, B. and Svobodin, A. (2003), “Sistemy navedeniya raket klassa “zemlya-zemlya” – osnova dal'nego ognеvogo porazheniya nazemnykh tseley” [Earth-ground-class missile guidance systems - the basis of long-range fire attack of ground targets], *High-precision weapons*, pp. 24-26.
3. Zweibaum, F. (1986), Radiometry and military, *Photonics Spectra*, No. 8, pp. 113-116.
4. Savenkov, A. (1990), “Razrabotka vysokotochnykh vsepogodnykh sistem navedeniya malorazmernykh sredstv porazheniya ob'ektov VVT” [Development of high-precision all-weather guidance systems for small-sized weapons of weapons and military equipment], *Defense Equipment*, No. 9, pp. 18-19.
5. Sotnikov, A.M. and Gavrilov, A.B. (2004), “Model' protivodeystviya upravlyayemym sredstvam porazheniya s radiometricheskimi golovkami samonavedeniya” [Model of counteraction to controlled weapons with radiometric homing heads], *Information Processing Systems*, No. 11(39), pp. 185-190.
6. (2004), “Umenie byit nevidimym. Konstruktsiya “Kontrast KMS” – kvintessentsiya maskirovochnogo iskusstva” [The ability to be invisible. The design “Contrast KMS” is a quintessence of masking art], *Defense Express*, No. 12(37).

7. Sotnikov, A.M., Krasnoshapka, I.V. and Gavrilov, A.B. (2005), "Metod snizheniya ra-diometricheskoj nablyudayemosti nazemnykh malorazmernykh ob"yektov" [The method of reducing the radiometric observability of ground-based small-sized objects], *Information Processing Systems*, No. 1(41), pp. 169-172.

8. Sydorenko, R.H., Hridin, V.I., Reznichenko, A.I. and Filippenkov, O.V. (2018), "Otsinka efektyvnosti znyzhennia radiolokatsiinoi pomitnosti ob'ektiv za rakhunok vykorystannia rozsiuchykh ta pohlynaiuchykh pokryttiv" [Evaluation of efficiency of reduction of radar visible objects by using scattering and absorbing coatings], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 1(53), pp. 189-194. <https://doi.org/10.30748/soivt.2018.53.27>.

9. Betyaev, Y. (1988), "Radiopogloshchayushchiye materialy i tekhnologiya "Stels" [Radio absorbing materials and technology "Stealth"], *Foreign Military Review*, No. 6, pp. 45-46.

10. Antyufeev, V.I., Bykov, V.N. and Makarenko, B.I. (2002), "Primeneniye printsipov radiometrii v korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistemakh navigatsii letatel'nykh apparatov po nazemnym oriyentiram" [Application of the principles of radiometry in the correlation-extremal navigation systems of aircraft on landmarks], *Arsenal XXI*, No.1, pp. 37-41.

11. Sydorenko, R.H., Akulinin, H.V. and Skopintsev, O.O. (2017), "Pasyvni zasoby radioelektronnoho zakhystu ob'ektiv vid vplyvu suchasnykh ta perspektyvnykh zasobiv urazhennia" [Passive facilities of radio electronic defense of objects from influence modern and perspective decimators], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 1(26), pp. 156-159. <https://doi.org/10.30748/nitps.2017.26.31>.

12. Berkovich, R. (1968), "Sovremennaya radiolokatsiya Analiz, raschet i proektirovanie sistem" [Modern radiolocation. Analysis, calculation and design of systems], Book on demand, Moscow, 700 p.

Надійшла до редколегії 27.03.2019

Схвалена до друку 21.05.2019

Відомості про авторів:

Сидоренко Руслан Григорович

кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3097-6747>

Акулінін Глеб Васильович

кандидат технічних наук доцент
доцент Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-7313-9164>

Безверхий Сергій Анатолійович

молодший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2767-3753>

Гончаров Андрій Анатолійович

курсант
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0997-4250>

Information about the authors:

Ruslan Sydorenko

Candidate of Technical Sciences Senior Research
Lead Researcher
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3097-6747>

Gleb Akulinin

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-7313-9164>

Serhii Bezverkhyyi

Junior Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2767-3753>

Andrii Goncharov

Cadet
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0997-4250>

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕРОПРИЯТИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ
ОТ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Р.Г. Сидоренко, Г.В. Акулинин, С.А. Безверхий, А.А. Гончаров

Проведена оцeнка возможностей разведки объектов аппаратурой радиотепловой разведки, которая установлена на космических аппаратах, самолетах-разведчиках и беспилотных летательных аппаратах. Получены аналитические выражения для расчета отношения сигнал/шум, который воспринимается глазом оператора на радиотепловом изображении и эффективности снижения радиотепловой заметности объектов при их защите с помощью рассеивающих и поглощающих покрытий. Разработан математический аппарат для оценки эффективности снижения радиотепловой заметности объектов за счет использования рассеивающих и поглощающих покрытий.

Ключевые слова: снижение заметности объектов, рассеивающие и поглощающие покрытия, средства разведки, радиоэлектронная защита.

EFFICIENCY OF MEASURES OF RADIO ELECTRONIC PROTECTION OF OBJECTS FROM RADIOMETRIC DETECTION SYSTEMS BY USING SPECIAL COATINGS

R. Sydorenko, G. Akulinin, S. Bezverkhyy, A. Goncharov

One of the most significant factors in improving the effectiveness of measures to reduce the visibility of troops and objects is the means of reducing the visibility on the basis of scattering and absorbing coatings, the application of which leads to a significant reduction in the range and probability of identification and identification of objects. The purpose of the article is to develop a mathematical apparatus for assessing the effectiveness of measures of radio-electronic protection of objects from radiometric detection systems through the use of special coatings. An estimation of the possibilities of exploration of objects by equipment of radio-thermal exploration, which is installed on spacecraft, reconnaissance aircraft and unmanned aerial vehicles. The necessary data for the calculation of objects and conditions of exploration by radiometric detection systems are given. Provision is required for the calculation of the initial data on objects and terms of conduct of intelligence. The coefficients of extinction of radio waves in the atmosphere, clouds and rain and other precipitation s are analyzed and summarized in a systematic form. The analytical expressions for calculating the signal-to-noise ratio perceived by the operator's eye on the radio-thermal image and the efficiency of reducing the radio thermal visibility of objects during their protection with the help of scattering and absorbing coatings are obtained. A mathematical device was developed for assessing the efficiency of reducing the radio thermal imprinting of objects due to the use of scattering and absorbing coatings. As a result, a mathematical instrument was developed to assess the effectiveness of radio-electronic protection of objects from radiometric detection systems, which would allow to assess the reduction of the object's visibility from radiometric detection systems for the practical determination of the effectiveness of the application of special coatings.

Keywords: *reduced visibility of objects, scattering and absorbing coatings, radio thermal intelligence systems, radio electronic protection.*