УДК 537.876 DOI: 10.30748/zhups.2019.61.13

Р.Г. Сидоренко, Г.В. Мегельбей, Г.В. Рибалка, А.І. Резніченко, О.О. Скопінцев

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

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ВІД ВПЛИВУ СУЧАСНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ ЗАСОБІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА УРАЖЕННЯ

Проведений аналіз принципів побудови і функціонування сучасних й перспективних засобів виявлення та ураження. Наведені заходи для зниження помітності озброєння та військової техніки в усіх діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектру. Проведені оцінки радіоелектронного захисту об'єктів військового призначення на основі використання перспективних пасивних засобів захисту, які показують принципову можливість забезпечення необхідних значень відбивних властивостей об'єктів захисту на робочих частотах сучасних та перспективних засобів ураження. Сформульовані основні переваги від запропонованих пропозицій для зниження помітності озброєння та військової техніки.

Ключові слова: *зниження помітності, радіоелектронний захист, високоточна зброя, озброєння та військова техніка.*

Вступ

Аналіз принципів побудови і функціонування сучасних й перспективних засобів ураження, що реалізовані у формі високоточної зброї (ВТЗ) показав, що для вирішення завдання високоточного наведення необхідні здобуття, аналіз і обробка інформації про об'єкти ураження за допомогою інтегрованих в єдиний комплекс засобів виявлення і наведення (самонаведення). Ця інформація поступає в системи виявлення і наведення (самонаведення) через середовище поширення, в загальному випадку яке є ділянкою атмосфери в районі цілі.

Для захисту озброєння та військової техніки (ОВТ) та об'єктів військового призначення від високоточних засобів ураження можуть бути застосовані усі більш або менш дієві заходи і засоби, причому концентрація цих заходів і засобів буде найбільшій в районі цілі, тобто на ділянці самонаведення ВТЗ (виявлення цілі).

Таким чином, протидія системам виявлення і наведення (самонаведення), виходячи з умов їх функціонування, може бути здійснена по наступних основних напрямах:

– на системі самонаведення (виявлення);

– на середовищі поширення;

– на об'єкті ураження (або місцевості).

На систему самонаведення (виявлення) ВТЗ протидія може бути організована шляхом постановки активних перешкод приймальним пристроям головок самонаведення (ГСН). При цьому основною умовою ефективності використання активних засобів протидії є забезпечення перевищення рівня перешкоди над сигналом. Проте використання активних перешкод, призначених для зриву функціонування роботи ГСН, вимагає апріорного знання часу і напряму приходу ВТЗ (напрями виявлення), що утрудняє їх використання на практиці. Крім того, постановка активних перешкод приводить до ускладнення електромагнітної обстановки в районі цілі і зниження скритності об'єктів захисту.

На середовище поширення протидія може бути організована шляхом розпилення в атмосфері різних відбивачів випромінювання, використання димових і пилових завіс. Проте, відносно постановки аерозольних і аналогічних ним перешкод необхідно відзначити, що їх використання обмежене малим часом життя аерозолів і пін, а використання дипольних відбивачів в міліметровому діапазоні довжин хвиль не ефективно з причини необхідності використання на порядок більшої кількості пачок дипольних відбивачів порівняно з сантиметровим діапазоном хвиль.

На об'єкті захисту (місцевості) заходи протидії, що проводяться, мають бути направлені на зменшення (спотворення) того або іншого інформаційного параметру, що використовується в тій або іншій системі самонаведення (виявлення). Для цього використовуються пасивні засоби маскування, які не вимагають апріорних відомостей про напрям застосування ВТЗ і детальної інформації про її характеристики.

Постановка проблеми. Проведений аналіз сучасних воєнних конфліктів показав, що найбільші втрати в них несли війська, найменш захищені від дії високоточних засобів ураження противника. Усе більша частина завдань бою (операції) вирішувалася протиборчими сторонами із застосуванням високоточної зброї. Так, в операції "Союзницька сила" до 95% ударів по позиціях сил протиповітряної оборони Югославії було нанесено із застосуванням ВТЗ (при результативності ударів не менше 70%).

Основними цілями сучасних високоточних засобів ураження, крім радіоелектронних засобів управ-

© Сидоренко Р.Г., Мегельбей Г.В., Рибалка Г.В., Резніченко А.І., Скопінцев О.О., 2019

ління військами і зброєю противника, були ще й зразки ОВТ та важливі об'єкти державної інфраструктури.

Це вимагає переходу радіоелектронної боротьби (РЕБ) від радіоелектронного подавлення і захисту радіоелектронних засобів (РЕЗ) до комплексного вогневого ураження та РЕБ і радіоелектронного захисту не тільки РЕЗ, але й ОВТ та об'єктів інфраструктури.

Виходячи з вищевикладеного проблема зниження ефективності сучасних та перспективних засобів виявлення та ураження ОВТ й об'єктів військового і державного призначення є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням забезпечення радіоелектронного захисту від керованих засобів ураження в останній час приділяється багато уваги.

В роботах [1-4] розглянуті основні напрямки створення систем та засобів радіоелектронного захисту для підвищення живучості об'єктів військового призначення, в умовах застосування по ним сучасних та перспективних засобів ураження, а також зниження ефективності їх застосування.

Мета статті – розробка нових пропозиції щодо удосконалення пасивних засобів радіоелектронного захисту об'єктів від впливу сучасних та перспективних засобів виявлення та ураження в усьому діапазоні частот електромагнітного спектру.

Виклад основного матеріалу

Основним завданням пасивних засобів радіоелектронного захисту об'єктів є зниження їх помітності. Основні заходи щодо зниження помітності об'єктів необхідно здійснювати в наступних діапазонах довжин хвиль:

− оптико-візуальному (видимому) – 0,3-0,8 мкм;

− інфрачервоному (ІЧ) – 3-5 і 8-14 мкм;

− лазерному – 1,06 і 10,6 мкм;

− радіолокаційному – 0,3-4,5 см.

При цьому в якості показників помітності (демаскуючих ознак) об'єктів в приведених вище діапазонах довжин хвиль доцільно прийняти:

− в оптико-візуальному (видимому) діапазоні – контрастний образ об'єкту, спотворення характеристик фону (тіні які створюються об'єктом), спотворення характеристик фону за рахунок руху об'єкту;

− в ІЧ-діапазоні – середню по поверхні різницю радіаційних температур об'єкту і фону;

− в лазерному діапазоні – питомі ефективні поверхні розсіювання (ЕПР) об'єктів;

− в радіолокаційному діапазоні – середнє значення ЕПР і сукупність значень ЕПР в різних секторах спостереження відповідно до структури діаграми зворотного розсіювання об'єкту спостереження (оглядовий режим), радіолокаційний портрет об'єкту (режим детальної розвідки).

Для зниження помітності об'єктів в оптико-візуальному діапазоні довжин хвиль основні зусилля слід направляти на зменшення контрасту яскравості між об'єктом і фоном. Тому найбільш поширеним способом зниження помітності об'єктів є їх фарбування, причому максимальний ефект дає трьох та чотирибарвне деформуюче фарбування [5], ефективність застосування якого визначається:

– яскравим контрастом К з оточуючим фоном, при цьому додатковою інформацією є кольоровий контраст між об'єктом і фоном;

$$K = \frac{I_o - I_\phi}{I_\phi + I_c \tau_a}, \qquad (1)$$

де I_o, I_ϕ, I_c – яскравості об'єкту, фону та серпанку;

τ_a – коефіцієнт пропускання атмосфери.

– габаритами об'єкту;

– складністю зовнішніх поверхонь об'єкту.

Тому для зниження яскравого контрасту чотирьохбарвне деформуюче фарбування складається з основного (захисного) кольору та трьох контрастних по відношенню до нього додаткових кольорів (рисунок 1):

– для рослинних фонів основним кольором буде зеленувато-коричневий, а додатковими – світло-зелений, жовто-сірий, світло-сірий, темно-сірий, коричневий;

– для пустинних фонів при основному жовто-сірому кольорі додатковими будуть світло-сірий, темно-сірий, зеленувато-коричневий;

– для сніжних фонів основним кольором є білий, додатковими –світло-сірий, темно-сірий, зеленувато-коричневий.

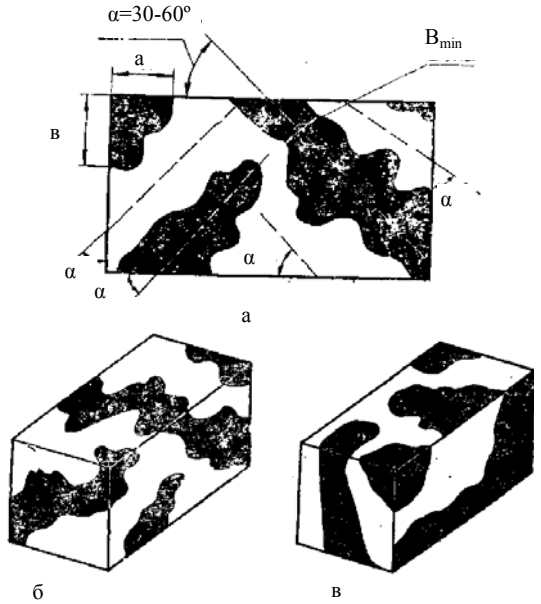


Рис. 1. Варіант форми та розташування плям деформуючого фарбування:
а – розташування плям по відношенню до контуру об'єкту (кут нахилу великих осей плям $\alpha = 30 - 60^\circ$; $a \neq b$; $B_{\min} = 50$ см; б − вірно; в − невірно) [5]

Основний колір чотирьохбарвного деформуючого фарбування займає 40-50% площі об'єкту. Осі його плям складають з лініями зовнішнього контуру шару з діелектричного матеріалу кути від 30 до 60˚.

Контраст між основним та додатковими кольорами буде не менш 0,4. Він перевіряється за формулою:

$$K = \frac{(r_1 - r_2)}{r_1}, \qquad (2)$$

де r_1 та r_2 – коефіцієнти яскравості відповідно світлого і темного кольорів сусідніх плям фарбування, що визначаються за допомогою хроматичної та ахроматичної шкали.

До високоефективних засобів зниження помітності в оптико-візуальному діапазоні можна віднести також різного роду штучні елементи, що деформують контури об'єктів: фальшборти, протитіньови екрани, зрізану рослинність, маскуючи сітки (як правило, радіопоглинаючі).

Захист об'єктів від керованих засобів ураження з оптичними засобами наведення забезпечується шляхом постановки аерозольних перешкод та використання дипольних відбивачів.

Проведений аналіз показав, що використання перерахованих способів і засобів зниження помітності може істотно зменшити дальність виявлення об'єктів типовими оптико-візуальними системами розвідки і управління зброї. При цьому середній час виявлення збільшиться більш ніж в півтора рази (до 35-45 с) [6].

Основним напрямом подальшого розвитку систем і засобів зниження помітності в оптичному діапазоні довжин хвиль, має бути створення та використання покриттів з керованими оптичними характеристиками, що "працюють" у всіх діапазонах електромагнітного спектру.

В ІЧ діапазоні довжин хвиль тепловізійна апаратура в якості вхідного сигналу сприймає різницю радіаційних температур об'єкта і фону у відповідному спектральному діапазоні $\Delta\lambda_1$ (3-5 мкм) та $\Delta\lambda_2$ (8-14 мкм). Тому для визначення можливості виявлення і розпізнавання об'єктів ОВТ практично важливо виконати кількісну оцінку цієї різниці.

Загальний вираз для різниці радіаційних температур ΔT_p може бути знайдено шляхом прирівнювання різниці енергетичної світності (власної та відбитої) об'єкта і фону в діапазоні $\Delta\lambda_j$ ($j = 1, 2$), обумовленої різницею температур і коефіцієнтів випромінювання об'єкта і фону, до різниці енергетичної світності абсолютно чорних тіл (АЧТ) з відповідною різницею радіаційних температур об'єкта і фону.

При цьому світності об'єкта і фону визначаються як [7–8]:

$$M(T_o) = (1 - \varepsilon_o)E + \varepsilon_o M_o; \qquad (3)$$

$$M(T_\phi) = (1 - \varepsilon_\phi)E + \varepsilon_\phi M_\phi, \qquad (4)$$

де $T_o, T_\phi, \varepsilon_o, \varepsilon_\phi$ – абсолютні температури і коефіцієнти випромінювання об'єкта і фону відповідно;

M_o, M_ϕ – енергетична світність АЧТ при температурах T_o, T_ϕ;

E – опромінення поверхні випромінюванням навколишнього середовища.

Позначивши $\Delta T = T_o - T_\phi$ та $\Delta\varepsilon = \varepsilon_o - \varepsilon_\phi$ різницю енергетичної світності об'єкта і фону можна записати у вигляді:

$$\Delta M = \varepsilon_o M(\Delta T) + \Delta\varepsilon M(T_\phi) - \Delta\varepsilon E. \qquad (5)$$

Різниця енергетичної світності чорних тіл з різницею радіаційних температур ΔT_p має вигляд:

$$\Delta M(\Delta T_p) = \Delta T_p \frac{\partial M}{\partial T}. \qquad (6)$$

Прирівнюючи (5) і (6) і враховуючи, що $\frac{\partial M}{\partial T} = \frac{CM(\Delta T)}{\lambda \Delta T^2}$, де C – постійна, що дорівнює 1,44 10^4 мкм, остаточно отримуємо вираз для різниці радіаційних температур об'єкта і фону

$$\Delta T_p = \varepsilon_o \Delta T + \frac{\Delta\varepsilon(M(T_\phi) - E)\lambda T_\phi^2}{CM(T_\phi)}. \qquad (7)$$

Таким чином, з наведених співвідношень, радіаційний температурний контраст різноорієнтованих поверхонь об'єкта залежить від багатьох факторів (температури і коефіцієнтів випромінювання об'єкта і фону, температури і стану навколишнього середовища, освітленості прямим і розсіяним випромінюванням сонця та ін.), які слід враховувати при його оцінці.

Нижче наведено результати розрахунку значень радіаційного контрасту температур наземного об'єкта в діапазонах 3-5 і 8-14 мкм на різних фонах (земля, пісок, трава, асфальт), прогрітого пробігом на трасі, в штатному виконанні і обладнаного комплексом засобів зниження помітності. Коефіцієнти випромінювання заданих фонів в діапазонах 3-5 і 8-14 мкм [8] приведені в табл.1.

Таблиця 1

Коефіцієнти випромінювання заданих фонів в діапазонах 3-5 та 8-14 мкм

Діапазон довжин хвиль, мкм	Фон спостереження, ε_ϕ				
	Земля	Пісок (вологий)	Пісок (сухий)	Трава	Асфальт
3-5	0,8	0,97	0,85	0,86	0,88
8-14	0,88	0,97	0,91	0,91	0,95

Для проведення розрахунків використовувалися наступні вихідні дані [8]. Коефіцієнт випромінювання штатної краски брався $\varepsilon_0 = 0,85$. Температура об'єкта, прогрітого пробігом на трасі в штатному виконанні, приймалася рівною $T_o = 300$ ºК, обладнаного засобами

зниження помітності $T_{зо} = 300$ ºК, температура фону приймалася рівною температурі навколишнього повітря $T_{ф} = 290$ ºК.

Передбачалося, що засоби зниження помітності застосовуються в двох варіантах:

− проведені заходи теплоізоляції від внутрішніх джерел нагріву, що призводять до зниження температури корпусу об'єкта;

− додатково до заходів теплоізоляції використані покриття зі зниженим коефіцієнтом випромінювання, що дорівнює 0,2.

Для діапазону 3-5 мкм враховувався вплив на радіаційну температуру об'єкта сонячного випромінювання. Розрахунки проводилися для зенітної відстані сонця 40º, середньої прозорості атмосфери і безхмарної погоди.

Результати оцінки радіаційного контрасту горизонтальних поверхонь об'єкта для штатного варіанта та для варіантів із заходами зниження помітності наведені в табл. 2. В чисельнику наведені значення радіаційного контрасту для діапазону 3-5 мкм, в знаменнику - для діапазону 8-14 мкм.

Таблиця 2

Значення радіаційного контрасту горизонтальних поверхонь об'єкту для безхмарної погоди

Фон спостереження	ΔT_p, (штатний варіант)	ΔT_p, (теплоізоляція)	Зниження контрасту ε_o
Земля	8,3/8,1	2,6/2,2	0,05
Пісок (вологий)	8,35/6,55	2,4/0,6	2,3
Пісок (сухий)	8,5/7,7	2,55/1,74	0,7
Трава	8,45/7,7	2,56/1,74	0,7
Асфальт	8,7/10	2,6/1	1,74

З таблиці видно, що застосування заходів теплоізоляції, що призводять до зниження температури поверхні об'єкта з 300ºК до 293ºК, призводить до зниження радіаційного контрасту в середньому для розглянутих фонів в діапазоні 3-5 мкм в 3,3 рази, а в діапазоні 8-14 мкм в 5,5 раз. Додаткове до заходів теплоізоляції зниження коефіцієнта випромінювання в обох діапазонах до 0,2 призводить до зменшення радіаційного контрасту в діапазоні 3-5 мкм майже в 6 разів, а в діапазоні 8-14 мкм радіаційний контраст збільшився майже в 1,2 рази . Це свідчить про те, що в залежності від різниці термодинамічних температур об'єкта і фону існує оптимальне значення коефіцієнта випромінювання покриття для розглянутих довжин хвиль, що забезпечує мінімальний контраст з фоном.

Так, якщо в діапазоні 3-5 мкм при коефіцієнті випромінювання покриття, що дорівнює 0,2, спостерігається істотне зниження контрасту, то в діапазоні 8-14 мкм контраст може значно знизитися при коефіцієнті випромінювання рівному 0,7. Необхідно також відзначити, що ймовірність розкриття об'єкта (виявлення або розпізнавання) визначається не середнім по поверхні тепловим контрастом, а так званим, контрастом Дойла [8], що дорівнює:

$$\Delta T_в = \frac{1}{\Delta T_p^2 + \sigma_{\Delta T}^2}, \qquad (8)$$

де $\overline{\Delta T_p}$ - середній за площею об'єкта тепловий контраст;

$\sigma_{\Delta T}$ - середньоквадратичне відхилення варіацій контрасту по площі об'єкта.

Отже для зниження помітності об'єктів в ІЧ діапазоні довжин хвиль основні зусилля зосереджуються головним чином на зниженні контрастних радіаційних температур поверхні об'єкту і вирівнюванні їх з температурою фону. Для цього використовуються такі засоби зниження помітності:

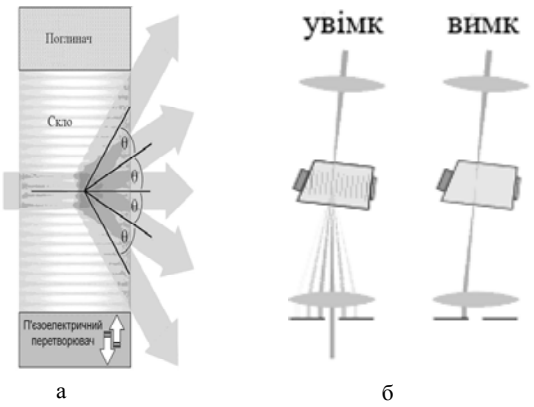
– "подвійний дах" над моторним відділенням ОВТ;

− фальшборт з резінокорда над елементами ходової частини, що нагріваються;

− легко змиваємі піни з різними присадками, які швидко наносяться;

− швидкознімні теплоізолюючі матеріали та екрани і так далі.

В лазерному діапазоні довжин хвиль для зниження помітності об'єктів може використовуватися акусто-оптичний модулятор (АОМ). Принцип дії АОМ заснований на дифракції світла на ультразвуковій хвилі, що біжить, в оптично прозорому матеріалі (склі). Ультразвукову хвилю, що біжить, створює п'єзоелектричний перетворювач, приєднаний до скляної пластини. Завдяки появі ділянок стискування і розтягування, що виникають в склі і розрізняються показником заломлення, в середовищі формуються дифракційна решітка. Лазерний промінь, дифрагуючи на решітці, утворює декілька вихідних пучків (дифракційних порядків), рознесених в просторі під рівними кутами відносно один одного. За допомогою апертури зі всіх вихідних променів виділяється перший максимум, який існує лише за наявності звукової хвилі в модуляторі, і блокуються всі інші (рис. 2).



а б

Рис. 2 Варіант побудови та застосування АОМ:
а – варіант побудови АОМ;
б − схема застосування АОМ

При цьому розподіл інтенсивності вихідних пучків визначається співвідношенням:

$$I = \frac{I_0 \sin^2\left(\frac{u}{u^2}\right)\sin^2\left(N \cdot v\right)}{N^2 \sin^2 v}, \qquad (9)$$

де I_0 – інтенсивність лазерного променю;

N – кількість відбивних елементів дифракційної решітки.

Другий множник формули (9) – $\sin^2 u / u^2$ визначає дифракцію від кожного відбивного елементу дифракційної решітки. Тут:

$$u = \frac{\pi a\left(\sin\psi + \sin\phi\right)}{\lambda}, \qquad (10)$$

де a – ширина робочої грані штриха дифракційної решітки;

λ – довжина хвилі;

ϕ – кут дифракції;

ψ – кут падіння лазерного променю.

Третій множник формули (9) – $\sin^2(N \cdot v) / sin^2 v$ визначає основні характеристики спектру і положення головних дифракційних максимумів діаграми розсіювання дифракційної решітки. Тут:

$$v = \frac{\pi d\left(\sin\psi + \sin\phi\right)}{\lambda}, \qquad (11)$$

де d – постійна дифракційної решітки.

Значна частина енергії лазерного променю зосереджується у вузьких кутових секторах (головних дифракційних максимумах), відмінних від напрямів розповсюдження головних дифракційних максимумів діаграми розсіяння дифракційної решітки.

Тому при застосуванні АОМ спостерігатиметься значне зниження інтенсивності лазерного променю.

При здійсненні процесу захисту військ та об'єктів від систем радіолокаційної (РЛК) та радітеплової розвідки вирішальними є питання зниження вторинного випромінювання цілей і зменшення контрастів радіояскравості [9].

Під вторинним випромінюванням прийнято розуміти випромінювання, що приходить в напрямі, зворотному напряму опромінення цілі. Характер вторинного випромінювання залежить від:

– електричних властивостей;

– розмірів, конфігурації, переносного руху і взаємного переміщення елементів об'єкту;

– довжини хвилі;

– закону модуляції і поляризації зондуючого сигналу.

Кількісне вторинне випромінювання оцінюється ефективною поверхнею розсіювання об'єктів. Зменшення ЕПР цілей є одним з важливих напрямів боротьби із радіолокаційними засобами противника, що пов'язане, головним чином, з можливістю зниження потрібних енергетичних потенціалів передавачів перешкод, кількості дипольних відбивачів, ЕПР пасток і так далі. Одночасно зменшується і дальність виявлення цілей радіолокаційними засобами. Якщо ЕПР фону прийняти рівною $\sigma_o^{\phi} \approx 20$ дБ, то для зниження РЛК помітності наземного об'єкту необхідне виконання умови $\sigma_{ц} \approx \sigma_0^{\phi} = 20$ дБ. В цьому випадку дальність виявлення радіолокаційними засобами зменшиться в 3,2 рази ($R \approx \sqrt[4]{100} = 3,2$).

Проте зниження дальності пропорційне $\sqrt[4]{\sigma_{ц}}$, тоді як потрібний енергетичний потенціал передавачів перешкод, кількість дипольних відбивачів і тому подібне є лінійною функцією.

До основних методів зменшення ЕПР об'єктів ОВТ відносяться:

– методи, засновані на формуванні раціональної архітектури конструкції об'єктів;

– методи, засновані на управлінні розсіюванням ЕМХ;

– методи, в основу яких покладено застосування розсіючих та поглинаючих покриттів (РПП).

Додання малопомітної архітектури конструкції об'єктів, які захищаються, характерно для нових зразків ОВТ, і неможливо для штатного озброєння, що зв'язане з організаційними, конструктивними і технологічними проблемами.

Крім того, при розробці нової техніки у багатьох випадках по функціональних міркуваннях неможливо змінити форму, що має значну ЕПР. Тому на практиці формування раціональної архітектури конструкції об'єктів виробляється комплексно, з урахуванням можливого оптимального використання РПП. Найбільш значимі результати в області зниження радіолокаційної помітності отримані в ході виконання робіт за програмою "Стелс" [10].

Основними засобами управління розсіюванням ЕМХ є керовані покриття і керовані структури. Вони розміщуються на поверхні об'єктів, що захищаються, або поблизу них. Відмітною особливістю, що робить непридатним для захисту об'єктів ОВТ керованих покриттів і керованих структур, є те, що в їх склад входять керовані елементи, які змінюють свої електрофізичні або просторові параметри під дією керуючих сигналів від зовнішніх джерел. Найбільш поширеними конструкціями керованих структур є керовані навантаження, екрани, відбивачі-антени, відбивні решітки. Як керовані елементи використовуються металеві, феритові, сегнетоелектрічні, рідинні, плазмові елементи, розташовані в навантаженнях антен або областях фокусування променів.

Для зменшення ЕПР об'єктів використовуються РПП, що відрізняються великою різноманітністю, характеристиками, принципами побудови і можливостями по використанню.

Рішення задачі зниження РЛК помітності наземним

них об'єктів вимагає знання властивостей типових фонів, що відбивають і розсіюють. В роботі [11] наводяться багаточисельні дані для різних типів поверхонь в сантиметровому (СМ) та міліметровому (ММ) діапазоні хвиль ДХ. Деякі з цих даних приведені в табл. 3, табл. 4.

Таблиця 3

Характеристики відбивних властивостей деяких типів поверхонь в СМ ДХ ($\lambda = 3,2$ см)

Питома ЕПР, дБ	Фон
5-25	Суха трава
28	Пашня
41-25	Бетон
18-22	Трава
3-5	Молодий ліс

Таблиця 4

Характеристики відбивних властивостей деяких типів поверхонь в ММ ДХ ($\lambda = 8,6$ мм)

Питома ЕПР, дБ	Фон
16-10	Гравій
22-12	Бетон
16-10	Шлак
10-30	Асфальт

Їх аналіз показує, що для зниження РЛК помітності наземні об'єкти повинні володіти питомою ЕПР в СМ ДХ порядку 25 дБ, а в ММ ДХ – 20 дБ.

Енергетичні характеристики випромінювання поверхні візування і об'єктів, що знаходяться на ній, прийнято характеризувати ефективною радіояскравою температурою $T_{Яеф}$, яка при огляді земної поверхні з висоти H під кутом візування θ визначається виразом:

$$T_{Яеф} = \chi K(L)T + (1-\chi)K(L)T_{Яс} + [1-K(L)]T_{атм}, \quad (12)$$

де χ – випромінювальна здатність матеріалу;

$K(L) = \exp(-0,23\alpha L)$ – множник, що характеризує послаблення випромінювання на трасі поширення довжиною $L = H\sec\theta$;

α – погонний коефіцієнт послаблення [дБ/км];

T – термодинамічна температура візуємої ділянки;

$T_{Яс}$ – радіометрична температура стелі;

$T_{атм}$ – радіометрична температура стовпу атмосфери. Тоді контраст температур радіояскравих матеріалів з випромінювальними здібностями χ_1 та χ_2 визначається виразом:

$$\Delta T_{12} = K(L)(\chi_1 - \chi_2)(T - T_{Яс}). \quad (13)$$

Якщо прийняти конусну апроксимацію діаграми спрямованості антени (ДСА)

$$G(\theta,\phi) = \left\{\begin{matrix} 1, & (\theta,\phi) \in \Omega_A; \\ 0, & (\theta,\phi) \notin \Omega_A, \end{matrix}\right\}, \quad (14)$$

(Ω_A – тілесний кут, в якому зосереджена ДСА), то антенна температура сигналу від малорозмірного об'єкту, що займає тілесний кут Ω_0 та спостережуваного на однорідному фоні, визначається виразом:

$$T_A = \Delta T_{12}\frac{\Omega_0}{\Omega_A}. \quad (15)$$

Імовірність виявлення контрасту антенних температур визначається виразом:

$$P(\Delta T_A) = \Phi(x)\left(0,7\Delta T_A\frac{\sqrt{\Delta f\tau}}{T_ш}\right), \quad (16)$$

де $\Phi(x)$ – інтервал імовірності;

Δf – полоса пропускання високочастотної частини радіометра;

τ – час інтегрування;

$T_ш$ – температура власних шумів радіометра.

Радіометричний контраст вважається виявленим, якщо його помітність задовольняє умові:

$$P(\Delta T_A) \geq P_0, \quad (17)$$

де P_0 – задане значення імовірності.

З виразу (16) можна знайти величину граничного контрасту:

$$\Delta T_A = \frac{1,5T_ш\Phi(x)}{\sqrt{\Delta f\tau}}. \quad (18)$$

З аналізу виразу (18) виходить, що для зниження радіометричної помітності малорозмірних наземних об'єктів необхідне, щоб виконувалася умова:

$$\Delta T_A < \delta T, \quad (19)$$

де $\delta T = \frac{K_R T_ш}{\sqrt{\Delta f\tau}}$ – чутливість радіометру;

$K_R \geq 1$ – коефіцієнт, який залежить від типа радіометра.

Практично виконання умови (19) означає, що при однакових термодинамічних температурах об'єкту і фону повинна забезпечуватися рівність їх випромінювальних здібностей.

Для зміни енергетичних характеристик випромінювання малорозмірних наземних об'єктів необхідно застосовувати РПП, коефіцієнт поглинання яких має бути близький до випромінювальної здатності фонів підстилаючої поверхні.

Виходячи з отриманих в роботі [12] залежностей для випромінювальних здібностей типових фонів, визначених на підставі вихідних даних про характеристики типових покровів, представлених в

таблиці 5, а також даних, запозичених з [12] і приведених в табл. 6, витікає, що для зниження радіотеплової помітності наземних об'єктів РПП повинні мати коефіцієнт випромінювальної здатності порядку 0,79-0,95.

Таблиця 5

Діелектричні характеристики типових покровів у ММ ДХ

Вид покрову (фону)	ε	ε''	σ_ξ, м	λ, мм
Асфальт	2,5	$60\cdot10^{-2}$	$0{,}4\cdot10^{-3}$	8,6
	2,25	$20\cdot10^{-2}$		3,2
Бетон	5,5	$50\cdot10^{-2}$	$0{,}16\cdot10^{-3}$	8,6
	5,5	$40\cdot10^{-2}$		3,2
Пісок	4	$41\cdot10^{-2}$	$0{,}5\cdot10^{-3}$	8,6
	2,5	$6\cdot10^{-2}$		3,2
Вода	19,5	29	$0{,}08\cdot10^{-3}$	8,6
	6,42	8,24		3,2
Трава	1,1	$8\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	8,6
	1,1	$16\cdot10^{-2}$		3,2
Пашня	7,2	3	$30\cdot10^{-3}$	8,6
	6,1	1		3,2

Таблиця 6

Випромінювальна здатність деяких матеріалів і покровів

Матеріал	Випромінювальна здатність	Матеріал	Випромінювальна здатність
Пісок	0,90	Крупний гравій	0,84
Густа рослинність	0,93	Гладкі скали	0,75
Асфальт	0,83	Суха трава	0,91
Бетон	0,76	Сухий сніг (глибиною 28-75 см)	0,88-0,76
Пашня	0,92		

Аналіз результатів приведених в таблицях 3-6, показує, що для типових ситуацій з урахуванням відбивних та випромінювальних властивостей типових фонів підстилаючої поверхні, найбільш раціональним напрямом зниження радіолокаційної і радіотеплової помітності об'єктів ОВТ є використання РПП, які повинні забезпечувати питому ЕПР об'єктів захисту в СМ ДХ порядку 25 дБ, а в ММ ДХ – 20 дБ, при одночасному забезпеченні значень випромінювальної здатності, що знаходиться в границях від 0,79 до 0,95.

Висновки

Таким чином запропоновані нові пропозиції для удосконалення пасивних засобів радіоелектронного захисту об’єктів від впливу сучасних та перспективних засобів виявлення і ураження в усьому діапазоні частот електромагнітного спектру.

Використання на практиці зазначених пропозицій для зниження помітності ОВТ та об’єктів військового призначення буде мати наступні позитивні аспекти:

– практичний:

1) живучість об'єктів ОВТ (бронетехніка, авіаційна і ракетна техніка) може бути значно підвищена при існуючій архітектурі конструкції (форми) самих об'єктів;

2) підвищення ефективності використання озброєння і військової техніки може бути досягнуте за рахунок модернізації, а не створення принципово нового зразку ОВТ;

– військовий:

1) зниження оптико-візуальної, інфрачервоної, лазерної, радіолокаційної і радіотеплової помітності ОВТ та об’єктів військового призначення затрудняє використання для їх ураження високоточної зброї з усіма існуючими видами ГСН;

2) на відміну від активних засобів захисту забезпечує неможливість використання для ураження ОВТ та об’єктів військового призначення ракет, що наводяться по власному випромінюванню РЛС;

– техніко-економічний:

1) при відповідному рівні розвитку технологій забезпечується висока економічність при масовому виробництві;

2) зниження помітності техніки може бути досягнуте без істотних конструктивних змін.

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. Оцінка ефективності зниження радіолокаційної помітності об’єктів за рахунок використання розсіючих 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.

4. Савенков А. Разработка высокоточных всепогодных систем наведения малоразмерных средств поражения объектов ВВТ / А. Савенков // Оборонная техника. – 1990. – № 9. – С. 18-19.

5. Маскировка вооружения, техники и объектов / А.Ю. Королев, А.А. Королева, А.Д. Яковлев. – Санкт-Петербург: университет ИМТО, 2015. – 154 с.

6. 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.

7. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Дж. Ллойд. – М.: Мир, 1978. – 415 с.

8. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В.П. Иванов, В.И. Курт, В.А. Овсянников, В.Л. Филиппов. – Казань: Из-во ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. – 596 с.

9. 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.

10. Бетяев Ю. Радиопоглощающие материалы и технология “Стелс” // Зарубежное военное обозрение. – 1988. – № 6.– С. 45-46.

11. Шульгина Е.М. Радиотепловое зондирование земных покровов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 4. – С. 59-67.

12. Сотников А.М. Метод снижения радиометрической наблюдаемости наземных малоразмерных объектов / А.М. Сотников, И.В. Красношапка, А.Б. Гаврилов // Системи обробки інформації. – 2005. – № 1. – С. 169-172.

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 ognevogo 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. Sydorenko, R.H., Hridin, V.I., Reznichenko, A.I. and Filippenkov, O.V. (2018), “Otsinka efektyvnosti znyzhennia radiolokatsiinoi pomitnosti obiektiv za rakhunok vykorystannia rozsiiuchykh 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.

4. Savenkov, A. (1990), “Razrabotka vysokotochnykh vsepogodnykh sistem navedeniya malorazmernykh sredstv porazheniya ob”yektov 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. Korolev, A.Yu. Koroleva, A.A. and Yakovlev, A.D. (2015), “*Maskirovka vooruzheniya, tekhniki i ob”yektov*” [*Masking weapons, equipment and objects*], IMTO University, St. Petersburg, 154 p.

6. Sydorenko, R.H., Akulinin, H.V. and Skopintsev, O.O. (2017), “Pasyvni zasoby radioelektronnoho zakhystu obiektiv 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.

7. Lloyd, J. (1978), “*Sistemy teplovideniya*” [*Thermal imaging systems*], Mir, Moscow, 415 p.

8. Ivanov, V., Kurt, V., Ovsyannikov, V. and Filippov, V. (2006), “*Modelirovaniye i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov*” [*Modeling and evaluation of modern thermal imaging devices*], FNPC NPO GIPO, Kazan, 596 p.

9. Berkovich, R. (1968), “*Sovremennaya radiolokatsiya. Analiz, raschet i proektirovanie sistem*” [*Modern radiolocation. Analysis, calculation and design of systems*], Book on demand, Moskow, 700 p.

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

11. Shulgina, E.M. (1993), “Radioteplovoye zondirovaniye zemnykh pokrovov” [Radio thermal sensing of earth covers]. *Foreign Radioelectronics*, No.4, pp. 59-67.

12. Sotnikov, A.M., Krasnoshapka, I.V. and Gavrilov, A.B. (2005), “Metod snizheniya radiometricheskoy nablyudayemosti nazemnykh malorazmernykh obyektov” [The method of reducing the radiometric observability of ground-based small-sized objects], *Information Processing Systems*, No.1, pp. 169-172.

Надійшла до редколегії 03.06.2019
Схвалена до друку 13.08.2019

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

Мегельбей Ганна Василівна
кандидат технічних наук старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-2873-4677

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

Hanna Mehelbei
Candidate of Technical Sciences Senior Research
Lead Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-2873-4677

Рибалка Григорій Валерійович
кандидат технічних наук старший науковий співробітник
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9359-7982

Резніченко Анатолій Іванович
науковий співробітник
Харківського національного
університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-0445-5972

Скопінцев Олег Олександрович
доцент
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0002-4709-1427

Hryhorii Rybalka
Candidate of Technical Sciences Senior Research
Senior Researcher
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9359-7982

Anatolii Reznichenko
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-0445-5972

Oleh Skopintsev
Senior Lecturer
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0002-4709-1427

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПОРАЖЕНИЯ

Р.Г. Сидоренко, А.В. Мегельбей, Г.В. Рыбалка, А.И. Резниченко, О.А. Скопинцев

Проведен анализ принципов построения и функционирования современных и перспективных средств обнаружения и поражения. Рассмотрены мероприятия для снижения заметности вооружения и военной техники во всех диапазонах длин волн электромагнитного спектра. Проведены оценки радиоэлектронной защиты объектов военного назначения на основе использования перспективных пассивных средств защиты, которые показывают принципиальную возможность обеспечения требуемых значений отражающих свойств объектов защиты на рабочих частотах современных и перспективных средств поражения. Определены положительные аспекты использования предложенных средств снижения заметности для радиоэлектронной защиты вооружения и военной техники.

Ключевые слова: *снижение заметности, радиоэлектронная защита, высокоточное оружие, вооружение и военная техника.*

WAYS TO IMPROVE THE RADIO ELECTRONIC PROTECTION OF OBJECTS FROM THE IMPACT OF MODERN AND PERSPECTIVE MEANS OF DETECTION AND DAMAGE

R. Sydorenko, H. Mehelbei, H. Rybalka, A. Reznichenko, O. Skopintsev

The subject of the article is the passive means of radio-electronic protection of objects. The purpose of the article is to develop new proposals for the improvement of passive means of radio-electronic protection of objects from the influence of modern and perspective means of detection and damage throughout the range of the electromagnetic spectrum. The analysis of principles of construction and functioning of modern and perspective means of detection and defeat is carried out. The main directions of the further development of systems and means of reducing the visibility in the optical range of wavelengths, which will increase more than one and a half times the average time detection of objects of protection. Estimates of the radiation contrast of the horizontal surfaces of the object for the standard version and for variants with measures of reduction of visibility in the infrared wavelength range are given. The laser range of wavelengths is proposed to use an acoustic-optical modulator to reduce the object's visibility, which will allow a significant portion of the energy of the laser beam to be concentrated in narrow angular sectors. Based on the reflection and emitting properties of the typical backgrounds of the underlying surface, the most rational directions for reducing the radar and radio thermal visibility of weapons and military equipment are determined. Assessments of radio-electronic protection of military objects are carried out on the basis of the use of promising passive means of protection, which show the fundamental possibility of providing the necessary values of reflecting properties of objects of protection at working frequencies of modern and perspective means of damage. The practical, military and tactical and economic aspects of the use of the proposed proposals for radio-electronic defense of weapons and military equipment that reduce the visibility throughout the range of the electromagnetic spectrum, provide high efficiency in mass production and do not use significant structural changes in the objects of protection are determined.

Keywords: *reduced visibility, radio-electronic protection, high-precision weapons, weapons and military equipment.*