

# Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.96

DOI: 10.30748/nitps.2022.46.09

О.І. Сухаревський, В.О. Василець, В.Й. Климченко, К.А. Тах'ян

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІДБИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПЕРЗВУКОВИХ КРИЛАТИХ РАКЕТ

*Проведено оцінювання характеристик розсіювання моделей гіперзвукових ракет, а також впливу плазми на ці характеристики при русі ракети у іонізованому середовищі з високою швидкістю. Наведено короткий огляд методу розрахунку характеристик розсіювання повітряних об'єктів з неідеально відбиваючою поверхнею. Розглянуто умови, за яких гіперзвукові ракети рухаються у іонізованому середовищі, та визначені параметри плазмових шарів, що покривають ракету, для різних частотних діапазонів опромінення. Отримано характеристики вторинного випромінювання моделей двох гіперзвукових ракет – X-47M2 “Кинджал” та X-51A Waverider – у різних частотних діапазонах опромінення для кількох товщин плазмового шару при русі на різних висотах польоту.*

**Ключові слова:** моделювання, ефективна поверхня розсіювання, гіперзвукові крилаті ракети, виявлення, супроводження.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Поява на озброєнні армій провідних країн світу гіперзвукових літальних апаратів (ГЗЛА) [1–3] поставила перед радіотехнічними військами Повітряних Сил Збройних Сил України нові завдання щодо їх своєчасного виявлення та неперервного супроводження. Аналіз льотно-технічних характеристик означених засобів довів, що існуюча радіолокаційна система неспроможна [4–5] виявляти і супроводжувати перспективні ГЗЛА, оскільки область їхньої дії виходить за межі дії існуючої радіолокаційної системи за висотним і за швидкісним параметрами. Необхідними і невідкладними заходами мають стати розроблення і прийняття на озброєння спеціалізованих РЛС, здатних виявляти ГЗЛА на дальностях до 1000 км і на висотах до 60...80 км. Обґрунтування оперативно-тактичних вимог до означених засобів має спиратись на всебічний аналіз ГЗЛА як об'єктів радіолокації. Основною характеристикою ГЗЛА як об'єктів радіолокації є їхні відбивні властивості за наявності плазмових оболонок. В доступних джерелах означені характеристики взагалі не наводяться, за винятком [6], де наведено, що ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) ГЗКР X-51A Waverider становить 0,01 м<sup>2</sup>, що викликає великі сумніви.

Повна відсутність експериментальних даних про характеристики розсіювання гіперзвукових лі-

тальних апаратів і вплив на них плазмових оболонок змушує провести математичне моделювання відбивних властивостей ГЗЛА в характерних для оглядових РЛС частотних діапазонах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз існуючих і перспективних систем озброєнь, наукових публікацій і програмних досліджень [7–10], а також досвід локальних воєн показують особливу важливість якої в створенні і розвитку засобів озброєння і військової техніки набуває інформація про характеристики розсіювання (вторинне випромінювання) засобів повітряного нападу [7], наземної військової техніки [8–9] і надводних об'єктів [10].

Вирішення завдань виявлення і розпізнавання об'єктів в сучасній радіолокації вимагає апріорної інформації про їх радіолокаційні характеристики з урахуванням таких ускладнюючих чинників, як нерегулярність граничної поверхні, наявність радіопоглинаючих покриттів (РПП), плазмових оболонок [11] та ін. Оскільки проведення достатньо точних і статистично інформативних експериментальних досліджень розсіюючих властивостей радіолокаційних цілей є надто трудомісткою і витратною справою, особливої актуальності набуває математичне моделювання радіолокаційних характеристик літальних апаратів з урахуванням перерахованих вище чинників.

Проведені в [12] дослідження вторинного ви-

промінювання різноманітних засобів повітряного нападу, в тому числі крилатих ракет і безпілотних літальних апаратів, сприяли висуненню обґрунтованих вимог до радіолокаційних засобів їхнього виявлення та супроводження. Що стосується гіперзвукових літальних апаратів, політ яких здійснюється в плазмових оболонках, то дослідження їхніх відбивних властивостей досліджено частково і лише в оптичному діапазоні [11]. Характеристики розсіювання означених засобів в радіолокаційних діапазонах, наскільки відомо авторам, не проводились.

**Метою** статті є оцінювання характеристик розсіювання моделей гіперзвукових ракет X-47M2 “Кінджал” та X-51A Waverider у різних частотних діапазонах опромінення та впливу плазми на ці характеристики при русі ракет у іонізованому середовищі з високою швидкістю на різних висотах польоту.

## Виклад основного матеріалу

### 1. Опис методів розрахунку характеристик розсіювання повітряних об’єктів з неідеально відбиваючою поверхнею

Розрахунки базуються на оригінальних методах оцінювання характеристик розсіювання повітряних об’єктів складної форми (взагалі, з неідеально відбиваючою поверхнею) [12]. Це, по-перше, метод розрахунку інтегралів Кірхгофівського типу, що виникають при оцінюванні внеску гладких ділянок поверхні (можливо, з радіопоглинаючим покриттям) у загальне розсіяне поле [13]. При цьому, оцінювання внесків гладких ділянок поверхні об’єкту проводиться з урахуванням перевіддзеркалень між окремими ділянками. По-друге, це метод розрахунку внеску зламів поверхні (можливо, теж з радіопоглинаючим покриттям) у загальне розсіяне поле.

Відзначимо, що при чисельних розрахунках ЕПР за запропонованими методами основний час витрачається на розрахунок поля, яке відбите від гладких ділянок поверхні. У зв’язку з цим необхідність усереднення значень у частотному діапазоні з

метою отримання стійких оцінок ЕПР потребує значного збільшення часу розрахунку. Одним з факторів, що роблять ЕПР швидкоосцилюючою функцією частоти і ракурсу зондування, є залежність від цих параметрів різниці фаз, з якими складаються відгуки від різних ділянок поверхні об’єкту. Для зниження впливу цього фактору пропонується для стійкої оцінки ЕПР використовувати суму ЕПР окремих ділянок поверхні об’єкту, що досліджується. Оскільки дана сума у розрахунку не враховує фазових набігів від різних ділянок, така оцінка ЕПР нижче буде називатися “некогерентною” ЕПР (НЕПР). Значення НЕПР є гарною та достатньою стійкою оцінкою ЕПР у визначеному діапазоні зондуючих частот та ракурсів опромінення цілі.

Оцінювання характеристик розсіювання об’єктів засновано на роздільному оцінюванні внесків гладкої і кромкової частин поверхні об’єкта в загальне розсіяне поле. Поле (проекція на напрямок  $\vec{p}$ ), розсіяне гладкою частиною  $S_1$  (рис. 1) поверхні об’єкта в напрямку  $\vec{r}^0$ , може бути представлено у вигляді :

$$\vec{p} \times \vec{E}_{S_1} = -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \times \int_{S_1} \left( \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\vec{p} \cdot \vec{H}_\perp) + (\vec{p} \times \vec{r}^0) \cdot \vec{E}_\perp \right) \cdot \exp(-jk_0 (\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) ds, \quad (1)$$

де  $R$  – відстань від об’єкта до точки спостереження;

$$\vec{E}_\perp = \vec{n} \times \vec{E}; \quad \vec{H}_\perp = \vec{n} \times \vec{H};$$

$(\vec{E}, \vec{H})$  – повне поле;

$\vec{n}$  – орт зовнішньої нормалі до поверхні  $S_1$  в точках  $\vec{x}$ ;

$k_0$  – хвильове число у вільному просторі.

Зауважимо, що скрізь передбачалась часова залежність виду  $\exp(-j\omega t)$ .

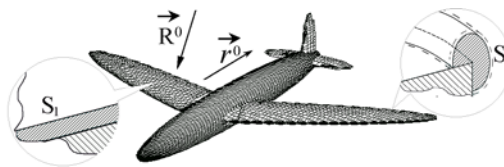


Рис. 1. Модель об’єкта у вільному просторі

Джерело: розроблено авторами.

У локаційному випадку, зазвичай, гладкі ділянки поверхні об’єкта мають великі електричні розміри і малі кривизни. Тому у наближенні фізичної оптики повернені на 90 градусів у дотичній площині тангенціальні складові поля  $\vec{E}_\perp(\vec{x}), \vec{H}_\perp(\vec{x})$  в (1) можуть бути замінені відповідними значеннями

$\vec{E}_\perp(\vec{x}), \vec{H}_\perp(\vec{x})$  на плоскій поверхні, яка є дотичною до поверхні  $S_1$  в точці  $\vec{x}$ . При цьому для ідеально провідних ділянок поверхні об’єкта, вкритих шаром радіопоглинаючого матеріалу (РПМ), дотична поверхня являє собою плоскопаралельний шар РПМ, розташований на ідеально провідній підложці

(рис. 2, а). У точках  $\vec{x}$  поверхні, що обмежує частини об'єкта, які цілком виконані з композиційного матеріалу, підбудовуються напівпростори з елект-

родинамічними характеристиками даного матеріалу (рис. 2, б).

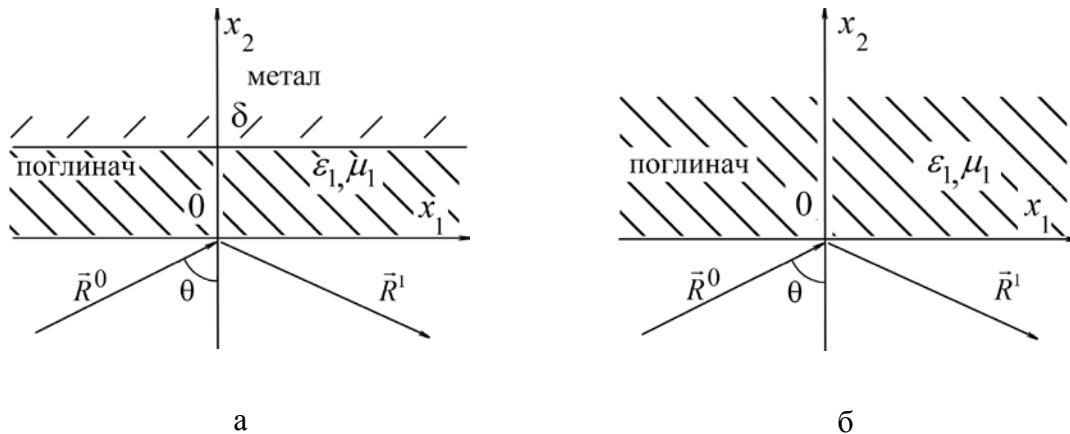


Рис. 2. Модельні задачі відбиття від гладкої частини поверхні об'єкта  
Джерело: розроблено авторами.

Рішення першої задачі для довільної поляризації падаючої хвилі було отримано в [14]. Не вдаючись в подробиці, зазначимо лише отриманий вираз для відбитого шаром поля:

$$\begin{pmatrix} \vec{E}(x) \\ \vec{H}(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{p}^0 \\ (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \end{pmatrix} \cdot \exp(jk_0(\vec{R}^0 \times \vec{x})) + \begin{pmatrix} \vec{p}^1 \\ (\vec{R}^1 \times \vec{p}^0) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \end{pmatrix} \cdot \exp(jk_0(\vec{R}^1 \times \vec{x})); \quad (2)$$

$$\vec{p}^1 = \vec{p}_T^1 - \vec{n} \frac{(\vec{p}_T^1 \times \vec{R}^0)}{\cos \theta}; \quad (3)$$

$$\vec{p}_T^1 = \frac{j \cdot c \cdot \cos \theta + 1}{j \cdot c \cdot \cos \theta - 1} \vec{p}_T^0 - \frac{2j \cdot c}{j \cdot c \cdot \cos \theta - 1} \times \left[ \vec{R}_T^0 \frac{(\vec{R}_T^0 \times \vec{p}^0)}{j \cdot c - \cos \theta} + \vec{R}_\perp^0 \frac{(\vec{R}_\perp^0 \times \vec{p}^0)}{\epsilon'_1 \mu'_1 \left( j \cdot c - \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos \theta} \right)} \right]; \quad (4)$$

де  $\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - 2\vec{n} \times (\vec{R}^0 \times \vec{n})$ ;  $\vec{R}_T^0 = \vec{R}^0 - \vec{n} (\vec{R}^0 \times \vec{n})$ ;

$$c = \sqrt{\frac{\mu'_1}{\epsilon'_1}} \cos \theta_1 \operatorname{tg}(k_1 \delta \cos \theta_1);$$

$$\vec{R}_\perp^0 = (\vec{n} \times \vec{R}^0);$$

$$\cos^2 \theta_1 = 1 - \frac{\sin^2 \theta}{\epsilon'_1 \mu'_1};$$

$\epsilon'_1, \mu'_1$  – відносні діелектрична та магнітна проникності матеріалу поглинач;

$\theta$  – кут падіння хвилі на шар.

Відзначимо, що отримані вирази (2–4) вже придатні для розрахунку розсіяного поля за допомогою (1) при будь-якій поляризації падаючої хвилі і будь-яких напрямках опромінення (крім близьких до дотичних). Зокрема, для кутів  $\theta$ , близьких до нуля, отриманий вираз (3) комплексного векторного коефіцієнта відбиття  $\vec{p}^1$  не містить невизначеності і при  $\theta = 0$  формули (3–4) переходять у добре відомі формули [15] для нормального падіння.

Якщо товщину шару з матеріалу поглинач прийняти  $\delta \rightarrow \infty$ , то модельну задачу можна розглядати як відбиття падаючої плоскої хвилі від півпростору з матеріалу поглинач (рис. 2, б). В цьому випадку

$$\vec{p}_T^1 = \frac{c \cdot \cos \theta - 1}{c \cdot \cos \theta + 1} \vec{p}_T^0 + \frac{2c}{c \cdot \cos \theta + 1} \times \left[ \vec{R}_T^0 \frac{(\vec{R}_T^0 \times \vec{p}^0)}{c + \cos \theta} + \vec{R}_\perp^0 \frac{(\vec{R}_\perp^0 \times \vec{p}^0)}{\epsilon'_1 \mu'_1 \left( c + \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos \theta} \right)} \right], \quad (5)$$

де  $c = \sqrt{\frac{\mu'_1}{\epsilon'_1}} \cos \theta_1$ .

Використовуючи вираз (5) можна розрахувати поле, розсіяне об'єктом або його частиною, повністю виконаною з діелектричного чи композитного матеріалу.

У наближенні фізичної оптики поле на “неосвітленій” поверхні об'єкта тотожно дорівнює нулю. Тому, замінивши поверхню  $S_1$  її освітленою частиною  $S'_1$  і, підставивши отримані вирази для поля (2)

в (1), одержимо наближений вираз для розсіяного поля:

$$\begin{aligned} \vec{p} \times \vec{E}^P(R, \vec{r}^0) \approx -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \times \\ \times \int_{S'_1} f(\vec{x}) \exp(ik_0 \Omega(\vec{x})) dS, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $f(\vec{x}) = \vec{h}(\vec{x}) \times \vec{p} + \vec{e}(\vec{x}) \times (\vec{p} \times \vec{r}^0)$ ;

$$\vec{e}(\vec{x}) = \vec{n} \times (\vec{p}^0 + \vec{p}^1);$$

$$\Omega(\vec{x}) = (\vec{R}^0 - \vec{r}^0) \times \vec{x};$$

$$\vec{h}(\vec{x}) = \vec{n} \times \left[ (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) + (\vec{R}^1 \times \vec{p}^1) \right];$$

$\vec{p}^1$  – комплексний вектор напруженості поля, відбитого плоскою поверхнею, дотичною до поверхні  $S'_1$  в точці  $\vec{x}$ , який може бути отриманий за допомогою виразів, наведених у [13].

Оскільки підінтегральна функція у (6) є швидкоосцилюючою, зазначений інтеграл розраховувався за допомогою спеціальних кубатурних формул. При цьому була проведена триангуляція поверхні об'єкту – область  $S'_1$  була покрита системою трикутників, а інтеграл (6) представлений у вигляді суми інтегралів по цих трикутниках. Після лінійної інтерполяції функцій  $f(\vec{x})$ ,  $\Omega(\vec{x})$  інтеграли по трикутниках можна отримати явно в барицентричних координатах [13].

Вираз для поля, розсіяного кромковими локальними ділянками, можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \vec{p} \times \vec{E}_{S_0} = -jk_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} (\vec{p} \times \vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0)); \\ \vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0) = \\ = \int_{S_0} \left[ \vec{H}_\perp - \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{E}_\perp \times \vec{r}^0) \right] \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \times \vec{x})) ds. \end{aligned} \quad (7)$$

В якості поверхні інтегрування  $S_0$  обрана то-роїдальна поверхня, що охоплює кромку (рис. 1). Поле, розсіяне кромковими ділянками поверхні, розраховується з використанням рішення модельної задачі про дифракцію похило падаючої плоскої монохроматичної хвилі на ідеально провідний клин з радіопоглинаючим циліндром на ребрі [16]. Також отриманий вираз, що дозволяє обчислити поле, розсіяне прямолінійними кромковими локальними ділянками розсіювання з РПМ на ребрі в загальному випадку бістатичного прийому [17].

Інтеграл  $\vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0)$  може бути записаний у вигляді [8]:

$$\vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0) = \int_L \exp[jk_0(\vec{R}^0 - \vec{r}^0) \cdot \vec{x}(l)] \vec{M}(l, \vec{r}^0) dl, \quad (8)$$

$$\text{де } \vec{M}(l, \vec{r}^0) = \int_{S'_0} \exp[-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{\xi})] \vec{G}(\vec{\xi}) dq;$$

$\vec{x}(l)$  – радіус-вектор точки  $P$  з координатою  $l$  на лінії кромки  $L$ ;

$S'_0$  – крива (частина окружності) на поверхні  $S_0$ , що належить площині ортогональній до  $L$ ;

$\vec{G}(\vec{\xi})$  – векторна функція, що містить тангенціальні складові поля  $(\vec{E}, \vec{H})$  на поверхні поглинаючого тора у розглянутому перерізі,  $dq = \rho_0 df$  – елемент дуги кривої  $S'_0$ .

Оцінюючи інтеграл (8) методом стаціонарної фази, ми можемо показати, що для лінії кромки у вигляді випуклої гладкої кривої існує, принаймні, дві точки стаціонарної фази (за винятком деякого спеціального випадку, тобто для тіла обертання з кромками – це випадок осьового зондування і суміщеного прийому). У цьому “спеціальному” випадку ми можемо обчислити  $\vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0)$  за допомогою чисельного інтегрування. В інших випадках метод стаціонарної фази для (8) дає

$$\begin{aligned} \vec{I}_{S_0}(\vec{r}^0) \approx \\ \approx \sum_{(l_0)} \exp \left[ jk_0(\vec{R}^0 - \vec{r}^0) \cdot \vec{x}(l_0) + j\beta \frac{\pi}{4} \right] \vec{M}(l_0, \vec{r}^0) \times \\ \times \sqrt{\frac{2\pi}{k_0 \times \kappa(l_0) (\vec{R}^0 - \vec{r}^0) \times \vec{v}(l_0)}}, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\kappa(l_0)$ ,  $\vec{v}(l_0)$  – кривизна та орт головної нормалі до лінії  $L$  в точці  $P_0$  з дуговою координатою  $l_0$ ;

$$\beta = \text{sgn} \left[ (\vec{R}^0 - \vec{r}^0) \times \vec{v}(l_0) \right].$$

Символ  $(l_0)$  під знаком суми показує, що підсумовування має відбуватися тільки за “видимими” точками стаціонарної фази (щодо напрямків опромінення і прийому) [13].

## 2. Оцінювання параметрів плазмового шару, що виникає при швидкому русі ракети у іонізованому просторі

При швидкому русі ракети у іонізованому просторі на її поверхні виникає плазмовий шар [18]. Шар плазми на поверхні об'єкту можна розглядати як неідеально відбиваюче покриття, врахування впливу якого на характеристики розсіювання повітряного об'єкту може бути отримано за допомогою методів, що описані у попередньому підрозділі. Для врахування впливу плазмового шару необхідно оцінити його параметри – відносні діелектричну і магнітну проникності та товщину.

В [19] показано, що дійсна частина відносної діелектричної проникності плазми  $\epsilon'$  у першому наближенні може бути знайдена за допомогою наступної формули:

$$\epsilon' = 1 - 80,6 \frac{N'}{f^2}, \quad (10)$$

де  $f$  – частота зондувального сигналу в герцах;

$N'$  – кількість електронів на  $1 \text{ м}^3$ .

Концентрація електронів в плазмі може бути знайдена за допомогою графіка, що наведено у [18] і представлено на рис. 3. Графік демонструє залежність концентрації електронів у плазмі від швидкості руху ракети для різних висот польоту.

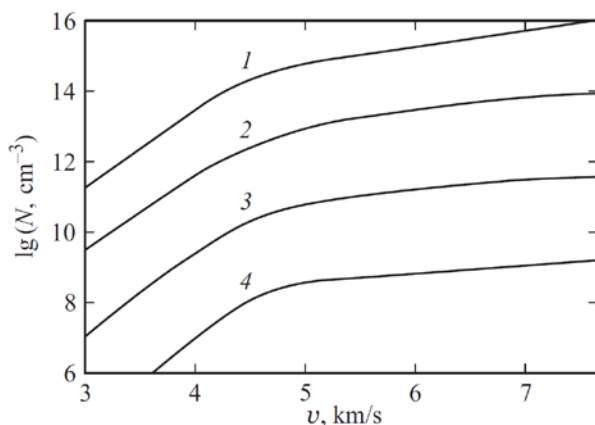


Рис. 3. Концентрація електронів  $N$  в залежності від висоти і швидкості набігаючого потоку: 1 –  $h=30$  км; 2 –  $h=60$  км; 3 –  $h=90$  км; 4 –  $h=120$  км  
Джерело: [18, с. 48].

В межах математичного моделювання було прийнято рішення обмежитися швидкістю повітряного об'єкту 4 км/год та висотами польоту 30 км та 60 км.

Враховуючи зондувальні частоти, для яких необхідно оцінити вплив плазми на вторинне випромінювання гіперзвукових ракет, були розраховані значення дійсної частини відносної діелектричної проникності плазми для різних умов моделювання.

Розраховані дані наведено у табл. 1. Дійсна частина відносної діелектричної проникності плазми завжди менше 1, може бути як додатною, так і від'ємною (зокрема, з великим модулем).

У випадку, якщо треба оцінити уявну частину відносної діелектричної проникності плазми, необхідно знати середню кількість співударів електронів з важкими частинками за одиницю часу [19]. Нажаль, такі дані відсутні. Однак в [18] вказано, що для вибраних умов польоту (швидкість 4 км/год, висота польоту 30–60 км) плазма для частот зондувальних сигналів 10 ГГц і менше веде себе як ідеально провідна структура.

Наперед зазначимо, що результати для описа-

них в табл. 1 відносних діелектричних проникностей, отримані в наступному підрозділі, практично не відрізняються від таких, що були отримані для ідеально провідних структур.

Таким чином, при подальшому моделюванні будемо вважати, що відносна діелектрична проникність плазми виключно дійсна. Відносна магнітна проникність плазми у верхніх шарах атмосфери не відрізняється від відносної магнітної проникності вільного простору і дорівнює 1 [19].

Таблиця 1  
Дійсна частина відносної діелектричної проникності плазми для різних умов моделювання при швидкості повітряного об'єкту 4 км/год

Частота зондувального сигналу, ГГц	Висота польоту, км	Концентрація електронів, $\text{см}^{-3}$	$\epsilon'$
3	30	$10^{13}$	-88
	60	$10^{11}$	0,111
1,304	30	$10^{13}$	-470
	60	$10^{11}$	-3.7
0,166	30	$10^{13}$	-29000
	60	$10^{11}$	-290

Джерело: розроблено авторами за даними [18, с. 48].

Що стосується товщини плазмового шару, то в [19] вказано, що вона може становити до 1/10 від характерного радіусу закруглення поверхні об'єкту.

Оскільки об'єкти, що розглядаються, мають різні розміри закруглень поверхні, прийнято рішення оцінити вплив плазми, використовуючи на поверхні моделі об'єктів еквідистантні шари плазми з товщинами 0,005 м, 0,01 м, 0,02 м, 0,05 м та 0,1 м.

Отримані дані вторинного випромінювання моделей об'єктів з плазмовими шарами різної товщини будуть проаналізовані, і за результатами аналізу будуть зроблені висновки щодо впливу плазми на вторинне випромінювання гіперзвукових ракет.

### 3. Результати математичного моделювання характеристик розсіювання ГЗКР

Математичне моделювання характеристик розсіювання було проведено для двох моделей (рис. 4) гіперзвукових ракет – X-47M2 “Кинжал” [20] та X-51A Waverider [21]. Моделювання проводилось для 3 зондувальних частот – 3 ГГц (довжина хвилі 10 см), 1,304 ГГц (довжина хвилі 23 см) та 166 МГц (довжина хвилі 180 см).

Було розглянуто зондування на горизонтальній та вертикальній поляризаціях. В якості опорних прикладів були отримані характеристики розсіювання ідеально провідних моделей без плазми. Розглянуто для кожної зондувальної частоти 2 варіанти товщини плазмового шару (0,01 м та 0,1 м).

Дійсна частина відносної діелектричної проникності плазми на цих частотах при швидкості повітряного об'єкту 4 км/год, наведена в табл. 2.

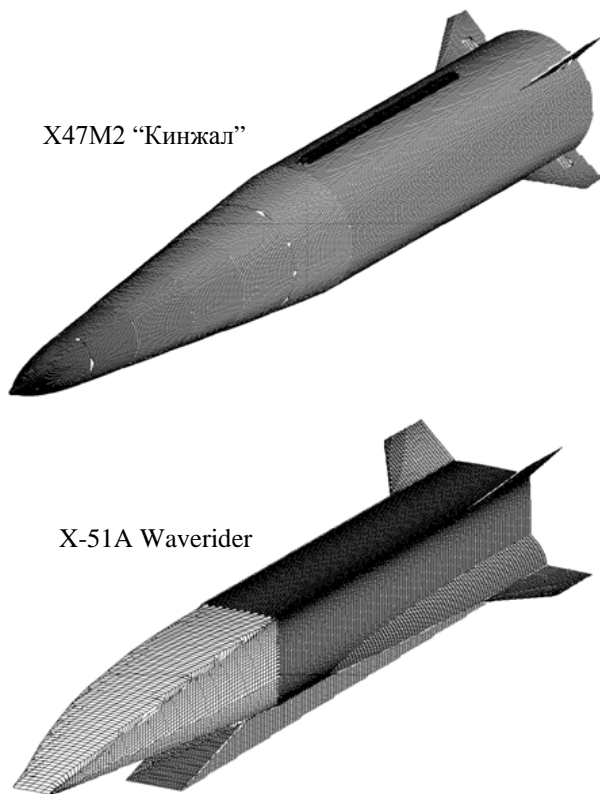


Рис. 4. Моделі гіперзвукових крилатих ракет  
Джерело: розроблено авторами.

При розрахунках дальності виявлення цілей радіолокаторами кругового огляду використовується значення кругової медіанної ЕПР. Саме ці значення занесені в табл. 2, як підсумкові дані, що характеризують відбивні властивості ГЗКР X-47M2 "Кинжал" та X-51A Waverider.

З аналізу підсумкових даних, що наведені в табл. 2, випливають такі висновки:

а) наявність плазмового кокону навколо гіперзвукового літального апарату несуттєво впливає на його радіолокаційну помітність. В залежності від товщини плазмового шару ЕПР гіперзвукового літального апарату може збільшуватись або зменшуватись, але таке збільшення (зменшення) не виходить за межі (30...50)% зміни значення ЕПР за відсутності плазмового шару. Такі зміни суттєвого впливу на дальність виявлення цілей не чинять.

б) поляризація опромінювання в сантиметровому і дециметровому діапазонах мало впливає на величину ЕПР. В метровому діапазоні переваги слід надавати горизонтальній поляризації.

## Висновки

1. Для отримання стійких оцінок відбиваючих властивостей такого об'єкта складної форми, як ГЗЛА, з неідеально відбиваючою поверхнею достатньо розглядати його ЕПР як суму ЕПР окремих ділянок гладкої і кромкової частин поверхні об'єкта.

Таблиця 2  
Кругові медіанні значення ЕПР ГЗКР

Тип ГЗКР	Товщина плазмового шару, м	Частота опромінення, МГц	Поляризація	Медіанне значення ЕВП, м <sup>2</sup>
X-47M2 "Кинжал"	0	3000	Гориз.	0,155
			Верг.	0,151
		1304	Гориз.	0,239
	Верг.		0,23	
	166	Гориз.	0,465	
		Верг.	0,415	
		0,01	3000	Гориз.
	Верг.			0,139
	1304		Гориз.	0,188
Верг.		0,215		
166	Гориз.	0,495		
	Верг.	0,44		
	0,1	3000	Гориз.	0,162
Верг.			0,153	
1304		Гориз.	0,24	
	Верг.	0,29		
166	Гориз.	0,76		
	Верг.	0,707		
	X-51A Waverider	0	3000	Гориз.
Верг.				0,021
1304			Гориз.	0,049
		Верг.	0,036	
166		Гориз.	0,617	
		Верг.	0,44	
		0,01	3000	Гориз.
Верг.				0,037
1304			Гориз.	0,049
	Верг.	0,036		
166	Гориз.	0,652		
	Верг.	0,44		
	0,1	3000	Гориз.	0,081
Верг.			0,16	
1304		Гориз.	0,14	
	Верг.	0,15		
166	Гориз.	0,54		
	Верг.	0,44		

Джерело: розроблено авторами.

Оскільки при цьому не враховуються фазові набіги від різних ділянок, то таку оцінку ЕПР можна вважати "некогерентною" ЕПР. Значення "некогерентної" ЕПР є гарною та достатньо стійкою оцінкою ЕПР у визначеному діапазоні зондуючих частот та ракурсів опромінення ГЗЛА.

2. Шар плазми на поверхні ГЗЛА являє собою неідеально відбиваюче покриття. Його основними характеристиками є відносні діелектрична і магнітна проникності та товщина. Відносна діелектрична проникність плазмового шару в діапазоні частот оглядових РЛС практично є такою ж як і для ідеально провідних структур. Відносна магнітна проникність плазми у верхніх шарах атмосфери не відрізняється

няється від відносної магнітної проникності вільного простору. Товщина плазмового шару залежить від швидкості польоту ГЗЛА і може мати товщину до 0,1 м.

3. Отримані характеристики вторинного випромінювання моделей двох гіперзвукових ракет – X-47M2 “Кинжал” та X-51A Waverider – у різних частотних діапазонах опромінення для кількох товщин плазмового шару при русі на різних висотах

польоту показують, що за будь-яких означених умовах польоту та опромінення (швидкість, висота, товщина плазмового шару, частотний діапазон) ЕПР гіперзвукових ракет змінюється несуттєво. Для деяких ракурсів чи їх діапазонів значення ЕПР можуть відрізнитись у півтора рази як в більшу, так і в меншу сторону, але в цілому ЕПР гіперзвукової ракети практично не змінюється під впливом плазми у порівнянні з ЕПР ідеально провідної моделі.

## Список літератури

1. Кондратюк Е. Исследования, проводимые в США в области создания гиперзвуковых летательных аппаратов. *Зарубежное военное обозрение*. 2013. № 2. С. 63-69.
2. Ярош С. П. Аналіз можливостей російського гіперзвукового авіаційного ракетного комплексу X-47M2 “Кинжал”. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 3(36). С. 79-85. <https://doi.org/10.30748/nitps.2019.36.09>.
3. Купцов И. М. Борьба с гиперзвуковыми летательными аппаратами: новая задача и требования к системе воздушно-космической обороны. *Военная мысль*. 2011. № 1. С. 10-17.
4. Климченко В. Й., Тютюнник В. О., Донченко М. М., Дончак Д. А. Проблеми набуття спроможностей РТВ з розвідки перспективних засобів повітряного нападу. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. № 3(44). С. 108-115. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.12>.
5. Комаров И. М. и др. Разработка и тактика применения гиперзвуковых летательных аппаратов по материалам зарубежных источников. *Инноватика и экспертиза*. 2017. № 1(19). С. 204-214.
6. Леонков А. Битва за гиперзвук. *Арсенал Отечества. Электронный журнал*. 2016. № 3(23). URL: <https://arsenal-otechestva.ru/article/829-bitva-za-giperzvuk> (дата звернення: 23.11.2021).
7. Padhy S., Chakraborty A., Bose A. Radar Cross Section Modelling and Simulation of Military Targets. *Journal of Computational Intelligence and Electronic Systems*. 2014. Vol. 3. No. 3. P. 177-181.
8. Ананьин Э. В., Андрющенко М. С. Методы исследований радиолокационной сигнатуры при разработке малогабаритных образцов военной техники. *Вопросы оборонной техники. серия 16: Технические средства противодействия терроризму*. 2015. № 9-10 (87-88). С. 102-108.
9. Салихов Р. Р., Хашимов А. Б. Суперкомпьютерное моделирование полей рассеяния на объектах сложной формы. *Вестник ЮУрГУ. Серия “Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника”*. 2013. Том 13. № 1. С. 55-60.
10. Vladimir Díaz Charris, José Manuel Gómez Torres. Analysis of radar cross section assessment methods and parameters affecting it for surface ships. *Ship Science & Technology*. 2012. Vol. 6. No. 11. P. 91-106.
11. Маркова М. В., Сергунов К. Ю. Решение задачи селекции путем оценки эффективной площади рассеяния плазменной оболочки. *Вестник Концерна ВКО “Алмаз – Антей”*. 2017. № 2. С. 10-15. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2017-2-10-15>.
12. Сухаревський О. І., Василець В. О., Нечитайло С. В. Довідник характеристик розсіювання повітряних та наземних радіолокаційних об'єктів. Харків : ХНУПС, 2019. 304 с.
13. Electromagnetic wave scattering by aerial and ground radar objects / Sukharevsky O. I., Vasylets V. O., Nechitaylo S. V., Orlenko V. M. Boca Raton, London, New York : CRC Press Taylor & Francis Group, 2015. 314 p.
14. Сухаревский О. И., Василец В. А., Сазонов А. З., Ткачук К. И. Расчет рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем объекте, частично покрытом радиопоглощающим материалом, с помощью триангуляционных формул. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2000. Т. 5. № 1. С. 47-54.
15. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва : Наука, 1973. 343 с.
16. Сухаревский О. И., Добродняк А. Ф. Трехмерная задача дифракции на идеально проводящем клине с радиопоглощающим цилиндром на ребре. *Известия вузов. Радиофизика*. 1988. Т. 31. № 9. С. 1074-1081.
17. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Сиренко Ю. К., Сухаревский И. В., Сухаревский О. И., Яшина Н. П. Харків : Крок, 2000. 344 с.
18. Мартин Дж. Вход в атмосферу. Введение в теорию и практику. Москва : Мир, 1969. 320 с.
19. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва : Наука, 1989. 544 с.
20. X-47M2 “Кинжал”. URL: <http://surl.li/bxufa> (accessed: 23.11.2021).
21. X-51 WaveRider. URL: <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104467/x-51a-waverider/> (accessed: 23.11.2021).

Надійшла до редколегії 02.11.2021

Схвалена до друку 18.01.2022

### Відомості про авторів:

**Сухаревський Олег Іллій**  
доктор технічних наук професор  
провідний науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-4607-5361>

### Information about the authors:

**Oleg Sukharevsky**  
Doctor of Engineering Science Professor  
Leading Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-4607-5361>

**Василець Віталій Олексійович**

доктор технічних наук старший науковий співробітник  
провідний науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3614-559X>

**Климченко Василь Йонович**

кандидат технічних наук доцент  
провідний науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-3999-8130>

**Тах'ян Кристина Альбертівна**

науковий співробітник  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

**Vitaliy Vasilets**

Doctor of Engineering Science Senior Researcher  
Leading Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3614-559X>

**Vasyl Klimchenko**

PhD in Engineering Associate Professor  
Leading Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-3999-8130>

**Kristina Tahyan**

Researcher  
of Ivan Kozhedub Kharkiv National  
Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ  
ГИПЕРЗВУКОВЫХ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ**

О.И. Сухаревский, В.А. Василец, В.И. Климченко, К.А. Тахьян

*Проведено оцінювання характеристик рассеивания моделей гиперзвуковых ракет, а также влияния плазмы на эти характеристики при движении ракеты в ионизированной среде с высокой скоростью. Приведен короткий обзор метода расчета характеристик рассеивания воздушных объектов с неидеальной отражающей поверхностью. Рассмотрены условия, при которых гиперзвуковые ракеты двигаются в ионизированной среде, и определены параметры плазменных слоев, которые покрывают ракету, для разных частотных диапазонов облучения. Получены характеристики вторичного излучения моделей двух гиперзвуковых ракет - X-47M2 "Кинжал" и X-51A Waverider – в разных частотных диапазонах облучения для нескольких толщин плазменного слоя при движении на разных высотах полета.*

**Ключевые слова:** моделирование, эффективная поверхность рассеивания, гиперзвуковые крылатые ракеты, обнаружение, сопровождение.

**MODELING THE SCATTERING CHARACTERISTICS  
OF HYPERSONIC CRUISE MISSILES**

O. Sukharevsky, V. Vasylets, V. Klimchenko, K. Tahyan

*The scattering characteristics of hypersonic missile models are estimated, as well as the effect of plasma on these characteristics when the missile moves in an ionized medium at high speed. A short review of the method for calculating the scattering characteristics of aerial objects with a non-perfectly reflecting surface is given. The calculations are based on original methods for estimating the scattering characteristics of aerial objects with complex shape (in general, with a non-perfectly reflecting surface). The methods takes into account the contribution of smooth surface parts (possibly with non-perfectly reflecting surface) and surface breaks (possibly also with radar absorbing coating) to the full scattered field. The conditions under which hypersonic missiles move in an ionized medium are considered, and the parameters of the plasma layers that cover the missile are determined for different frequency ranges. The plasma layer on the surface of a hypersonic aerial object is a non-perfectly reflective coating. Its main characteristics are relative permittivity and permeability as well as thickness. The thickness of the plasma layer depends on the altitude and flight speed of hypersonic aerial object and can have a value up to 0.1 m. At the same time, the reflectivity of the plasma layer in the frequency range of observation radars is almost the same as for perfectly conducting objects. The scattering characteristics of two hypersonic missile models - Kh-47M2 Kinzhal and X51A Waverider - are obtained in different frequency ranges for several thicknesses of the plasma layer when moving at different flying altitudes. It has been shown that under any flight and radiation conditions (speed, altitude, plasma layer thickness, frequency range), the radar cross section of hypersonic missiles does not change significantly. For some aspect ranges the radar cross section can differ not more than one and a half times both upward and downward. But the median values of the radar cross section of a hypersonic missile do not change practically under the influence of plasma in comparison with the radar cross section of a perfectly conducting model.*

**Keywords:** modeling, radar cross section, hypersonic cruise missile, detection and tracking.