

УДК 621.396.677.859

С.В. Кукобко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК РОЗСІЯННЯ НАПІВАКТИВНИХ ГОЛІВОК САМОНАВЕДЕННЯ ЗЕНІТНИХ КЕРОВАНИХ РАКЕТ

На основі точного методу електродинамічного розрахунку отримані характеристики розсіювання двовірних моделей бортових антенних систем напівактивних голівок самонаведення зенітних керованих ракет з урахуванням впливу гострокінцевого діелектричного обтічника. Наявність такої інформації дозволила зробити порівняльні висновки щодо розсіюючих властивостей різних типів бортових антенних систем за наявності обтічників, про характер залежності їх ефективної поверхні розсіювання від частоти, геометричної форми та інших параметрів.

**Ключові слова:** бортова антенна система, характеристики розсіювання.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Антенні системи (АС) є одним з основних демаскуючих елементів повітряних об'єктів, при цьому найбільший внесок до розсіяного поля вносять дзеркальні антени з великою апертурою (в меншій мірі великі антенні решітки), які розташовані в носовій частині літального апарату. Так у найбільш небезпечному секторі кутів опромінювання в передній напівсфері внесок антен бортового радіолокатора в ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) літальних апаратів складає: для фронтальних літаків: від 10 – 20% до 40 – 50%, для ракет з самонаведенням: 30 – 90%, для крилатих ракет: 50 – 60%. У зв'язку з цим особливою важливістю набуває задача розрахунку ЕПР дзеркальних антен з носовими діелектричними обтічниками.

Найбільш відомі типи антен бортових радарів (рис. 1) можна розділити на антени з механічним скануванням (дводзеркальна антена та щілинна антенна решітка на приводі), та на антени з електронним управлінням променем (фазована антенна решітка (ФАР) з хвильоводною розподільчою системою), ФАР з оптичним живленням відбиваючого типу, ФАР з оптичним живленням прохідного типу (лінзова ФАР)) [1 – 3].

В статті для розрахунку ЕПР дзеркальних антен з носовими діелектричними обтічниками застосовується строгий метод розрахунку характеристик розсіювання для Е- та Н-поляризацій джерел первинного поля [4 – 5]. Метод базується на рішенні систем, які складаються з об'ємних інтегральних рівнянь (відносно поля в шарі обтічника) та інтегральних або інтегро-диференціальних рівнянь (віднос-

но щільностей поверхневих токів на екранах, що моделюють дзеркальні антени). Метод враховує всі можливі перевідбиття, що виникають між обтічником та антеною яка розташована під ним, а також малі радіуси кривизни в носовій області обтічника. Запропонований метод дозволяє розраховувати електромагнітні поля в ближній зоні антенної системи, зокрема безпосередньо під обтічником.

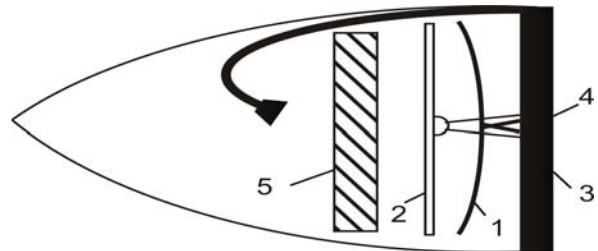


Рис. 1. Розміщення різних типів АС під носовим обтічником (1 – дводзеркальна антена; 2 – щілинна антена решітка на приводі; 3 – відбиваюча ФАР; 4 – ФАР з хвильоводною розподільчою системою; 5 – «лінзова» ФАР)

**Мета статті** – розрахунок та аналіз характеристик розсіювання дзеркальних антенних систем зенітних керованих ракет (ЗКР), які вкриті носовими діелектричними обтічниками

### Основний матеріал

Оскільки використовується метод дозволяє проводити розрахунки тільки двовірних моделей, перш за все розглянемо взаємозв'язки, що існують між модельними двовірними та реальними тривірними задачами електродинаміки. Для описання розсіюючих властивостей АС з обтічником будемо

використовувати поняття двомірної (погонної) ЕПР (ЕПР, яка віднесена до одиниці довжини утворюючої циліндричного розсіювача):

$$\sigma_{II} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\pi R \frac{|U_z^{p03}|^2}{|U_z^0|^2}, \quad (1)$$

де  $R$  – відстань до приймача;  $U_z^{p03} = E_z, H_z$  – напруженість розсіяного поля поблизу приймача;  $U_z^0 = E_z, H_z$  – напруженість падаючого поля.

Знаходження ЕПР нескінченних (за утворюючими) циліндричних тіл дозволяє отримати якісно вірні порівняльні висновки про властивості розсіювання різних об'єктів, про характер залежності їх ЕПР від частоти і інших параметрів. Разом з тим, існують тотожності, які виражають ЕПР для деяких типів реальних тримірних об'єктів (зокрема для дводзеркальної АС), як доданок відповідних двомірних ЕПР на безрозмірний коефіцієнт порядку зазвичай декількох десятків, який залежить від конфігурації розсіюючого об'єкта, напрямку зондування та поляризації зондуючого сигналу.

**Геометрія задачі.** Дзеркальні АС бортових пеленгаторів різних ЗКР дуже схожі між собою та мають досить складну геометричну форму: вони являють собою дві половини параболоїда обертання, які розділені між собою металевим екраном, до якого в фокусі дзеркала приєднані приймальні рупорні опромінювачі.

Таким чином, задача електродинамічного розрахунку таких АС є досить складною. Однак основний вплив на характеристики розсіювання АС ЗКР все таки мають дзеркало та опромінювач антени. Тому при проведенні розрахунків характеристик розсіювання розглядалась модель антенної системи, яка наведена на рис. 2

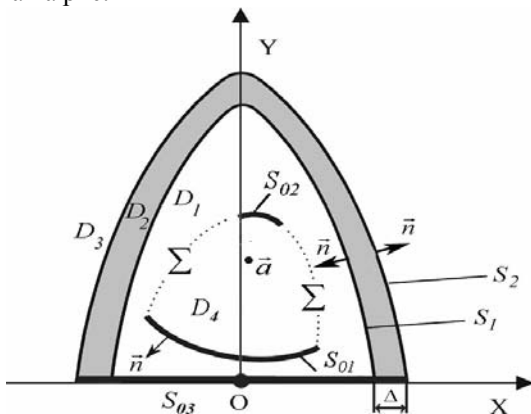


Рис. 2. Двомірний модель дводзеркальної АС, яка вкрита діелектричним обтічником

На рисунку  $S_{01}$  та  $S_{02}$  – незамкнуті параболічні ідеально провідні та нескінченно тонкі екрани, які відповідно моделюють дзеркало та опромінювач антени;  $D_2$  – обтічник, стінки якого виконані з діелектрику з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_1$ ;  $S_{03}$  – ідеально провідний екран, який моделює

апаратуру розміщену під антенною системою.

При розрахунках полів розсіювання такої антенної системи були застосовані системи інтегральних рівнянь для випадку Е-поляризації (2, 3):

$$E_z(\bar{X}) - E_z^0(\bar{X}) = - \int_{S_0} G(\bar{X}, \bar{\xi}) q(\bar{\xi}) dl_{\xi} - \quad (2)$$

$$- (k_1^2 - k_0^2) \iint_{D_2} E_z(\bar{\xi}) G(\bar{X}, \bar{\xi}) ds_{\xi}, \quad \bar{X} \in D_2;$$

$$\int_{S_0} G(\bar{X}, \bar{\xi}) q(\bar{\xi}) dl_{\xi} = E_z^0(\bar{X}) -$$

$$- (k_1^2 - k_0^2) \iint_{D_2} E_z(\bar{\xi}) G(\bar{X}, \bar{\xi}) ds_{\xi}, \quad \bar{X} \in S_0 \quad (3)$$

та системи інтегро-диференціальних рівнянь для випадку Н-поляризації (4, 5):

$$H_z(\bar{X}) - H_z^0(\bar{X}) = - \int_{S_0} \partial G(\bar{X}, \bar{\xi}) / \partial n_{\xi} p(\bar{\xi}) dl_{\xi} -$$

$$- (1 - \epsilon_0 / \epsilon_1) \int_S G(\bar{X}, \bar{\xi}) \partial H_z^-(\bar{\xi}) / \partial n_{\xi} dl_{\xi} - \quad (4)$$

$$- (k_1^2 - k_0^2) \iint_{D_2} H_z(\bar{\xi}) G(\bar{X}, \bar{\xi}) ds_{\xi}, \quad \bar{X} \in D_2;$$

$$\frac{\partial}{\partial n_x} \left( \int_{S_0} \frac{\partial G(\bar{X}, \bar{\xi})}{\partial n_{\xi}} p(\bar{\xi}) dl_{\xi} \right)^{\pm} =$$

$$= \frac{\partial H_z^0(\bar{X})}{\partial n_x} - \left( 1 - \frac{\epsilon_0}{\epsilon_1} \right) \int_S \frac{\partial G(\bar{X}, \bar{\xi})}{\partial n_x} \frac{\partial H_z^-(\bar{\xi})}{\partial n_{\xi}} dl_{\xi} - \quad (5)$$

$$- (k_1^2 - k_0^2) \iint_{D_2} \frac{\partial G(\bar{X}, \bar{\xi})}{\partial n_x} H_z(\bar{\xi}) ds_{\xi}, \quad \bar{X} \in S_0,$$

де  $E_z^0(\bar{X}), H_z^0(\bar{X})$  – первинне поле;  $G(\bar{X}, \bar{\xi})$  – функція Гріна для півпростору;  $\partial H_z^-(\bar{\xi}) / \partial n_{\xi}$  – граничне

значення нормальної похідної повного поля у випадку Н-поляризації на поверхні обтічника зі сторони протилежної вибраному напрямку нормалі  $\vec{n}$  (рис. 2);  $\epsilon_0$  – відносна діелектрична проникність вільного простору;  $\epsilon_1$  – відносна діелектрична проникність матеріалу, з якого виконано обтічник;  $k_0$  – хвильове число вільного простору;  $k_1 = k_0 \sqrt{\epsilon_1}$  – хвильове число в матеріалі, з якого виконано обтічник;  $q(\bar{\xi}), p(\bar{\xi})$  – величини пропорційні щільностям поверхневих токів на екранах для Е- та Н-поляризації, відповідно;  $S = S_1 \cup S_2, S_0 = S_{01} \cup S_{02} \cup S_{03}$ .

**Результати розрахунків характеристик розсіювання моделей голівок самонаведення ЗКР.** Було проведено моделювання характеристик розсіювання трьох типів голівок самонаведення, геометричні параметри яких близькі до реальних. Геометричні параметри дзеркал АС моделей ЗКР, що розглянуті в статті, наведені в табл. 1.

Форма обтічника ЗКР І описувалась рівнянням:

$$y = -5,69x^{1,47} + 1,6.$$

Таблиця 1  
Геометричні параметри антен ЗКР

ЗКР	Діаметр дзеркала, м	Висота підйому вершини дзеркала над основою обтічника, м	Фокусна відстань дзеркала, м	Розміри розкриву рупору, см	
				L <sub>Е</sub>	L <sub>Н</sub>
I	0,63	0,2	0,233	1,7	5,5
II	0,33	0,17	0,15	1,3	4,3
III	0,36	0,17	0,166	1,4	4,4

При цьому вважалось, що обтічник виконано зі скловолокна з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon_1 \approx 4$ .

Геометричні форми обтічників ЗКР I та ЗКР II були обрані схожими, та описувались наступними виразами: для обтічника ЗКР I

$$y = -30,38x^{2,15} + 1,05,$$

для обтічника ЗКР II

$$y = -24,3x^2 + 1,05.$$

Обидва ці обтічники вважались виконаними з кераміки і при проведенні розрахунків діелектрична

проникність матеріалу стінки дорівнювала  $\epsilon_1 = 6$ .

При проведенні розрахунків вважалось, що товщина стінки обтічника дорівнює  $0,5\lambda_a/\sqrt{\epsilon_1}$ , де  $\lambda_a$  робоча довжина хвилі бортового локатору ЗКР (для ЗКР I  $\lambda_a = 0,04$  м, для ЗКР II та ЗКР III  $\lambda_a = 0,03$  м). Дводзеркальна антена була розташована симетрично вісі обтічника.

В теперішній час основним засобом виявлення ЗКР у польоті є літаки дальнього радіолокаційного виявлення AWACS, а також бортові багатофункціональні радіолокатори бойових літаків. Виходячі з цього, було проведено розрахунок ЕПР усереднених у частотному діапазоні цих радіолокаторів виявлення. Робочий діапазон довжин хвиль радіолокаційної станції виявлення AWACS: 8,75...9,45 см; робочий діапазон довжин хвиль бортових багатофункціональних радіолокаторів бойових літаків: 2...5 см.

Результати розрахунків залежності  $\sigma_{II}$  від кута обходу  $\theta$  ( $\theta=90^\circ$  відповідає опроміненню АС вздовж вісі обтічника) для двомірних моделей АС з урахуванням впливу обтічника ЗКР які розглядаються, наведені на рис. 3 – 5.

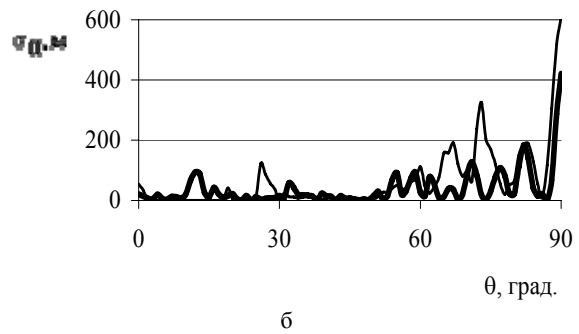
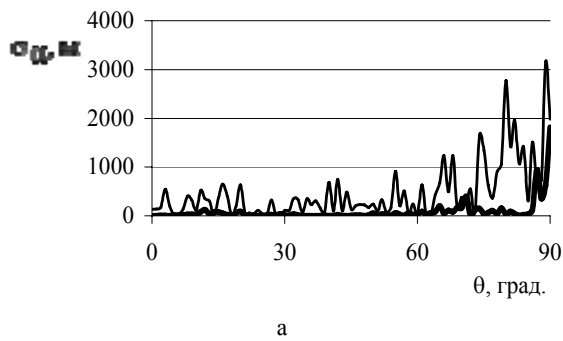


Рис. 3. Розподіл величини  $\sigma_{II}$  для моделі АС з обтічником ЗКР I, узгодженим на нормальне падіння

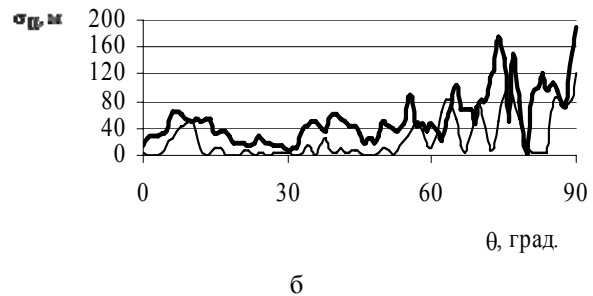
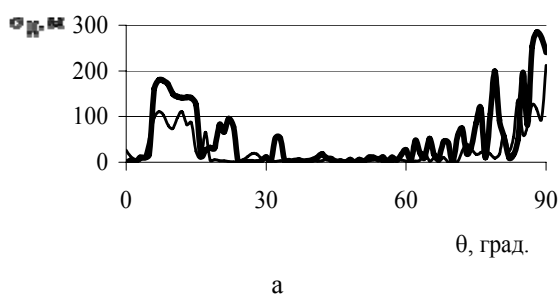


Рис. 4. Розподіл величини  $\sigma_{II}$  для моделі АС з обтічником ЗКР II, узгодженим на нормальне падіння

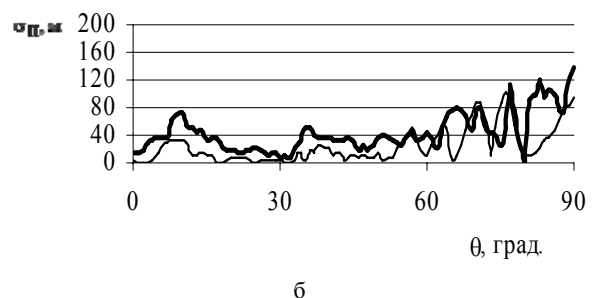
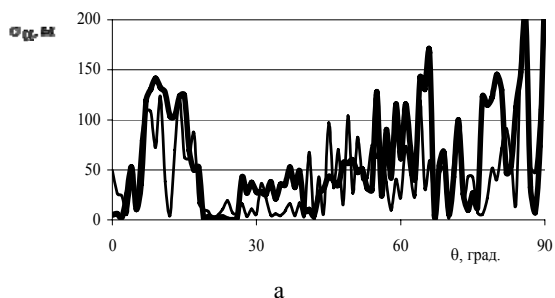


Рис. 5. Розподіл величини  $\sigma_{II}$  для моделі АС з обтічником ЗКР III, узгодженим на нормальне падіння

Рис. 3 відповідає ЗКР I, рис. 4 – ЗКР II, а рис. 5 – ЗКР III. На всіх трьох рисунках літерою (а) позначені залежності  $\sigma_{\Pi}$  усереднені в діапазоні довжин хвиль 2...5 см, а літерою (б) – в діапазоні довжин хвиль 8,75...9,45 см. Тонкими лініями зображено випадок Н-поляризації первинної плоскої хвилі, жирними – випадок Е-поляризації.

Аналіз залежностей на рис. 3 – 5 показує, як і слід було очікувати, що при опроміненні АС в діапазоні довжин хвиль 2...5 см, рівень розсіяного поля вище, ніж при опроміненні АС в діапазоні довжин хвиль 8,75...9,45 см. Загальний рівень розсіяного поля для моделі АС ЗКР I, яка має більші геометричні розміри, вище ніж для моделей АС ЗКР II та III.

У діапазоні кутів обходу  $10^{\circ} \leq \theta \leq 35^{\circ}$  рівень розсіяного поля, в основному, визначається полем, яке відбите стінкою обтічника (в цих випадках поверхня обтічника, яка опромінюється падаючою хвилею – найбільша). В діапазоні кутів  $35^{\circ} \leq \theta \leq 65^{\circ}$  рівень поля, що перевідбивається АС значно менше. Це можна пояснити тим, що при цих кутах падіння хвилі стінка обтічника є узгодженою, і відбиття від неї мале. Разом з тим, більша частина енергії, яка пройшла крізь стінку обтічника, дзеркально відбивається антеною.

У діапазоні кутів  $65^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$  основний внесок до розсіяного АС поля дають відбиття від дзеркальної антенної системи.

Аналіз діаграм оберненого вторинного випромінювання (ДОВВ), які отримані для АС ЗКР II та III (рис. 3 – 5), дозволяє заключити, що ці два обтічники схожі за своїми розсіюючими властивостями, що пояснюється схожістю їх геометричної форми. Необхідно також відмітити, що у випадку Н-поляризації середній рівень розрахованих ДОВВ вище, ніж у випадку Е-поляризації.

## Висновок

У роботі на основі методу точного методу розрахунку отримані характеристики розсіяння двовірних моделей ряду напівактивних голівок самонаведення зенітних керованих ракет. Отримані результати дозволили зробити висновок, що під певними ракурсами ( $10^{\circ} \leq \theta \leq 35^{\circ}$ ) наявність обтічника призводить до значного збільшення рівня полів розсіяння. Таким чином необхідно проводити роботи щодо мінімізації впливу обтічника не тільки на спотворення полів випромінювання АС, але й на поля розсіяння.

## Список літератури

1. Акоюн І.Г., Вексин С.І., Медведєв Г.П., Сухов А.М. Особенности построения и развития техники радиолокационных головок самонаведения в системах ракетного вооружения ВВС и ПВО // Радиотехника. – 2005. – №2. – С. 30-39.

2. Isby D.C. US Air Force are evaluating characteristics of new modernization of Raytheon's AIM - 120 AMRAAM // Jane's, Missiles & rockets. – 2004. – Vol.8, №1. – P. 79-83.

3. Синани А.И. Антенные и волноводные системы в НИИП им. В.В. Тихомирова // Антенны. – 2005. – Вып. 2. – С. 6-11.

4. Sukharevsky O.I., Kukobko S.V., Sazonov A.Z. Volume integral equation analysis of two-dimensional radome with a sharp nose // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 2005. – Vol.54, №4. – P. 1500-1506.

5. Кукобко С.В., Сазонов А.З., Сухаревский И.О. Электродинамический метод расчета двумерной модели двухзеркальной антенной системы с носовым диэлектрическим обтекателем // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10, №2. – С. 157-162.

Надійшла до редколегії 14.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, ст. наук. співр. О.В. Василець, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПОЛУАКТИВНЫХ ГОЛОВЕК САМОНАВЕДЕНИЯ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ

С.В. Кукобко

На основе точного метода электродинамического расчета получены характеристики рассеяния двумерных моделей бортовых антенных систем полуактивных головок самонаведения зенитных управляемых ракет с учетом влияния остроконечного диэлектрического обтекателя. Наличие такой информации позволило сделать сравнительные выводы относительно рассеивающих свойств различных типов бортовых антенных систем при наличии обтекателей, о характере зависимости их эффективной поверхности рассеивания от частоты, геометрической формы и других параметров.

**Ключевые слова:** бортовая антенная система, характеристики рассеяния.

## CALCULATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF THE SEMIPASSIVE HOMING HEAD OF THE ANTI-AIRCRAFT GUIDED MISSILES

S.V. Kukobko

On basis of exact electrodynamic calculation method scattering characteristics of the two-dimensional models of the aircraft antenna systems of the semipassive homing head of the anti-aircraft guided missiles taking into account sharp-nose dielectric radome obtained. Presence of such information allow to made comparative summary relative to scattering characteristics of different onboard antenna systems in the presence of radome, about against of radar cross section from frequency, geometry and others operation factors.

**Keywords:** onboard antenna system, scattering characteristics.