

УДК 621.396.96

Я.О. БЕЛЕВЩУК, В.О. ВАСИЛЕЦЬ, С.В. НЕЧИТАЙЛО

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Україна

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗСІЯННЯ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ, ОСНАЩЕНОЇ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИМИ АНТЕНАМИ

Розроблена модель поверхні автомобіля Урал-375Д радіолокаційної станції П-18. Розроблений метод розрахунку ефективної поверхні розсіяння наземного об'єкту, що має в своєму складі багатоелементну антену. Метод заснований на комбінованому використанні методу розрахунку ефективної поверхні розсіяння наземного об'єкту, що дозволяє знаходити поле, розсіяне ділянками корпусу більш великих розмірів, чим довжина зондувальної хвилі і методу розрахунку поля, розсіяного окремим елементом резонансних розмірів у вигляді циліндра. Проведені розрахунки ефективної поверхні розсіяння машини антенно-мачтового пристрою РЛС П-18 і проаналізовані їх результати залежно від ракурсу зондування.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіювання, багатоелементна антена.

Вступ

Постановка проблеми і аналіз літератури.

Одним з важливих чинників гарантованої поразки об'єкту супротивника є його своєчасне виявлення, а також ідентифікація з достатньою достовірністю. Виявлення об'єкту здійснюється по ряду демаскуючих ознак, одним з яких є радіолокаційна помітність (РЛП). Основною характеристикою, що визначає властивості техніки, як об'єкту, що відбиває електромагнітні випромінювання, є ефективна поверхня розсіяння (ЕПР). Для розробки ефективних способів зниження ЕПР наземних об'єктів складної форми необхідне знання апріорної інформації про їх радіолокаційні характеристики при таких ускладнюючих чинниках, як наявність підстилаючої поверхні, і складний конфігурації.

Оскільки проведення достатньо точних і статистично інформативних натурних експериментів по дослідженню реальних розсіюючих властивостей цілей є вельми трудомістким і дорогим заходом, особливої актуальності набуває розробка розрахункових методик для математичного моделювання радіолокаційних характеристик цілей складної форми з урахуванням перерахованих вище ускладнюючих чинників.

Армії крупних економічно розвинених держав мають в своєму розпорядженні радіолокаційні станції (РЛС) розвідки наземних цілей, 80% з яких працюють в діапазоні 8 000 - 10 900 МГц (довжина хвилі 3,8 – 2,8 см) [1]. Для розрахунку ЕПР зразків наземної військової техніки (ВТ) в сантиметровому діапазоні довжин хвиль використовується метод [2], що дозволяє знаходити поле, розсіяне ділянками корпусу більш великих розмірів, чим довжина зон-

дувальної хвилі. Даний метод враховує перевідбиття хвиль від підстилаючої поверхні з її довільними параметрами діелектричної і магнітної проникності. У ряді робіт [3 – 8], присвячених даній тематиці, наводяться результати розрахунків ЕПР різних об'єктів за допомогою вказаного методу. Відмінною рисою проведених розрахунків є той факт, що досліджувані об'єкти володіють поверхнею з елементами багатих розмірів в порівнянні з довжиною опромінюваної хвилі.

Разом з тим, деякі із зразків ВТ мають в своєму розпорядженні багатоелементні антени (БА), що складаються з елементів резонансних розмірів. Наприклад, в склад РЛС П-18 входить машина антенно-щоголового пристрою (АЩП) з БА (рис. 1). Кожен елемент антени є директорною антеною, що складається з вібраторів, сумірних з довжиною опромінювальної хвилі сантиметрового діапазону [9].



Рис. 1. Машина АЩП РЛС П-18

Таким чином, вищезгаданий метод розрахунку ЕПР наземних об'єктів в даному випадку не може бути застосований для розрахунку ЕПР БА. Для вирішення даного завдання потрібний комбінований метод розрахунку, що дозволяє застосовувати необхідний математичний апарат залежно від співвідношення «розмір об'єкту – довжина зондуєчої хвилі». Тому, розробка методу розрахунку ЕПР наземних об'єктів з БА представляється актуальним завданням.

Мета статті – розробка методу розрахунку ЕПР зразків наземної ВТ, що має у складі БА і аналіз отриманих результатів на прикладі машини АЦП РЛС П-18.

Основний матеріал

Базою машини АЦП є автомобіль Урал-375Д. Відповідно до конструкції автомобіля для проведення розрахунків ЕПР була створена модель його поверхні, яка представлена на рис. 2. Поверхня апроксимована за допомогою фрагментів 88 еліпсоїдів. Злами поверхні були промодельовані за допомогою 106 прямолінійних ділянок розсіювання крайового типу. Для розрахунку ЕПР моделі поверхні автомобіля Урал-375Д використовується метод розрахунку поля, розсіяного об'єктом, що враховує найбільш значущі шляхи розповсюдження електромагнітних хвиль, розсіяних системою «об'єкт – підстилюча поверхня» [2].

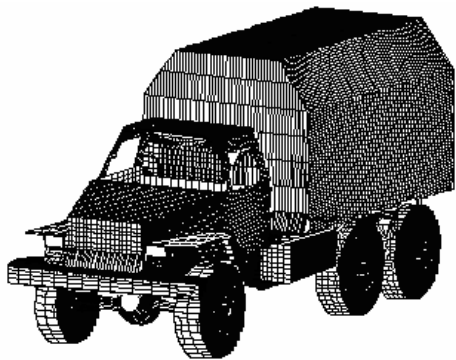


Рис. 2. Модель поверхні автомобіля Урал - 375Д

Антенна РЛС П-18 є антенною решіткою, що складається з шістнадцяти випромінюючих елементів, розташованих в два поверхи (рис. 3). Кожен елемент антенної решітки є антеною типу «хвильовий канал». Вона є стрілою, на якій розміщується група паралельних вібраторів: рефлектор, активний випромінювач і чотири директори (рис. 4).

Рефлектор забезпечує випромінювання енергії активним випромінювачем у напрямі директорів [9]. Стріла і вібратори є циліндрами. Для розрахунку ЕПР таких антенних решіток, що складаються з елементів-циліндрів, пропонується метод розрахунку поля, розсіяного окремим циліндром.

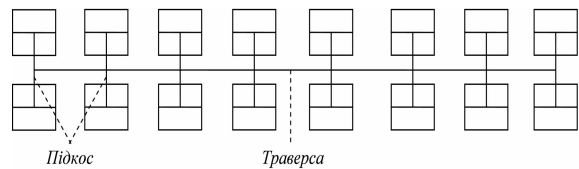


Рис. 3. Схема БА РЛС П-18

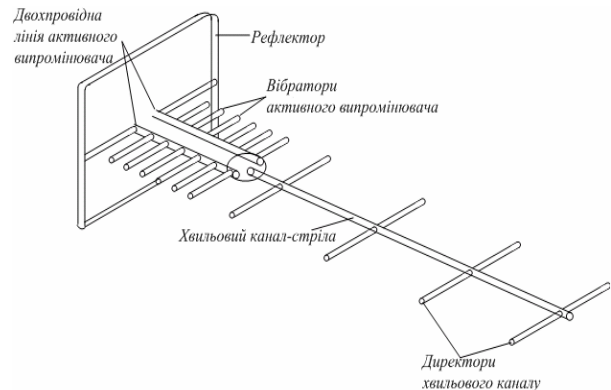


Рис. 4. Елемент БА РЛС П-18 – антена типу «хвильовий канал»

Основні розрахункові співвідношення. Нехай на ідеально провідний циліндр радіусу a і довжиною $2b$ падає плоска електромагнітна хвиля одичної амплітуди (рис. 5):

$$\begin{pmatrix} \vec{E}^0(\vec{X}) \\ \vec{H}^0(\vec{X}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{p}^0 \\ \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}(\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \end{pmatrix} e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{X})} = \begin{pmatrix} \vec{E}^0(x, y) \\ \vec{H}^0(x, y) \end{pmatrix} e^{jk_0 z \cos \theta_3}, \quad (1)$$

где $\vec{X} = (x, y, z)$ – точка на поверхні циліндра; $\vec{p}^0$ – орт поляризації падаючої хвилі; $\vec{R}^0 = (\cos \theta_1, \cos \theta_2, \cos \theta_3)$ – хвильовий вектор (орт) напрямку падаючої хвилі; $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ – хвильове число у вільному просторі; $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ – імпеданс вільного простору.

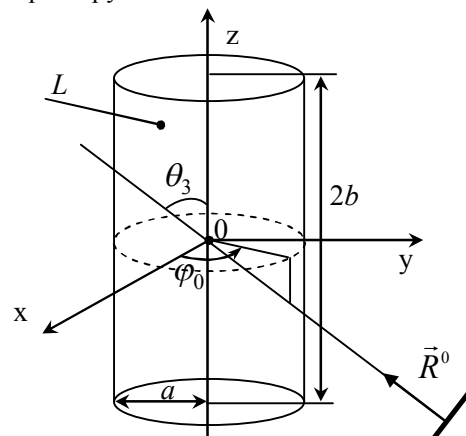


Рис. 5. Геометрія задачі

Залежність від часу дорівнює $e(-j\omega t)$.

Повне дифрагзоване поле

$$\vec{E}(\vec{X}) = \vec{E}^0(\vec{X}) + \vec{E}^{\text{рас}}(\vec{X});$$

$$\vec{H}(\vec{X}) = \vec{H}^0(\vec{X}) + \vec{H}^{\text{рас}}(\vec{X}),$$

(де $\vec{E}^{\text{рас}}(\vec{X})$ і $\vec{H}^{\text{рас}}(\vec{X})$ – поле, розсіяне циліндром) будемо шукати у вигляді [10]

$$\begin{pmatrix} \vec{E}(\vec{X}) \\ \vec{H}(\vec{X}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{\mathcal{E}}(x, y) \\ \vec{\mathcal{H}}(x, y) \end{pmatrix} e^{jk_0 z \cos \theta_3}. \quad (2)$$

Введемо позначення $\mathcal{E}_3(x, y) = u(x, y)$,

$\mathcal{H}_3(x, y) = v(x, y)$ і перейдемо до циліндричних координат. Тоді $\vec{\mathcal{E}}(x, y)$ та $\vec{\mathcal{H}}(x, y)$ можна виразити формулами:

$$\mathcal{E}_r = \frac{-1}{jk_0 \sin^2 \theta_3} \left[\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \cos \theta_3 \frac{\partial u}{\partial r} \right]; \quad (3)$$

$$\mathcal{H}_r = \frac{1}{jk_0 \sin^2 \theta_3} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \cos \theta_3 \frac{\partial v}{\partial r} \right]; \quad (4)$$

$$\mathcal{E}_\varphi = \frac{1}{jk_0 \sin^2 \theta_3} \left[\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{\cos \theta_3}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} \right]; \quad (5)$$

$$\mathcal{H}_\varphi = \frac{-1}{jk_0 \sin^2 \theta_3} \left[\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\cos \theta_3}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right]; \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_3 = u(r, \varphi); \quad (7)$$

$$\mathcal{H}_3 = v(r, \varphi). \quad (8)$$

Треті компоненти первинного поля в (1) запишемо, як

$$\begin{pmatrix} \mathcal{E}_3^0(r, \varphi) \\ \mathcal{H}_3^0(r, \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u^0(r, \varphi) \\ v^0(r, \varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_3 \\ q_3 \end{pmatrix} e^{-jk'r \cos(\varphi - \varphi_0)} = \begin{pmatrix} p_3 \\ q_3 \end{pmatrix} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-j)^m J_m(k'r) \cos(m(\varphi - \varphi_0)), \quad (9)$$

де $k' = k_0 \sin \theta_3$; $\cos \varphi_0 = \frac{-\cos \theta_1}{\sin \theta_3}$; $\sin \varphi_0 = \frac{-\cos \theta_2}{\sin \theta_3}$;

$\epsilon_m = \begin{cases} 1, & m=0; \\ 2, & m \neq 0; \end{cases}$; $J_m(k'r)$ – функція Бесселя 1-го роду.

Згідно з граничними умовами на бічній поверхні L ідеально провідного циліндру

$$u|_L = 0,$$

$$\text{тобто } u(r, \varphi) = u^0(r, \varphi) + U(r, \varphi)|_{r=a} = 0; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_L = -\frac{\partial v}{\partial r} = \frac{-\partial(v^0(r, \varphi) + V(r, \varphi))}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0, \quad (11)$$

де $U(r, \varphi)$, $V(r, \varphi)$ – треті компоненти розсіяного циліндром поля при падінні на нього хвилі $\vec{\mathcal{E}}^0(x, y)$, $\vec{\mathcal{H}}^0(x, y)$ (1).

Поле $U(r, \varphi)$ та $V(r, \varphi)$ знаходиться у вигляді:

$$\begin{pmatrix} U(r, \varphi) \\ V(r, \varphi) \end{pmatrix} = \sum_{m=0}^{\infty} \begin{pmatrix} a_m \\ b_m \end{pmatrix} H_m^{(1)}(k'r) \cos(m(\varphi - \varphi_0)), \quad (12)$$

де $H_m^{(1)}(k'r)$ – функція Ганкеля.

Підставивши (9), (12) в (10), (11) після перетворень отримаємо

$$a_m = -\epsilon_m (-j)^m p_3 \frac{J_m(k'a)}{H_m^{(1)}(k'a)}; \quad (13)$$

$$b_m = -\epsilon_m (-j)^m q_3 \frac{J'_m(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)}.$$

З урахуванням (13) $u(r, \varphi)$ та $v(r, \varphi)$ буде мати вигляд:

$$u(r, \varphi) = -p_3 \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-j)^m \left[\frac{J_m(k'a)}{H_m^{(1)}(k'a)} H_m^{(1)}(k'r) - J_m(k'r) \right] \cos(m(\varphi - \varphi_0)); \quad (14)$$

$$v(r, \varphi) = q_3 \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-j)^m \left[J_m(k'r) - \frac{J'_m(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)} H_m^{(1)}(k'r) \right] \cos(m(\varphi - \varphi_0)). \quad (15)$$

Підставивши вирази (14), (15) у (6) отримаємо

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_\varphi = & \frac{-p_3}{j \sin \theta_3} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-j)^m \left[J'_m(k'r) - \frac{J_m(k'a)}{H_m^{(1)}(k'a)} H_m^{(1)'}(k'r) \right] \cos[m(\varphi - \varphi_0)] + \\ & + \frac{q_3 \cos \theta_3}{jk_0 a \sin^2 \theta_3} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m (-j)^m m \left[J_m(k'r) - \frac{J'_m(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)} H_m^{(1)}(k'r) \right] \sin[m(\varphi - \varphi_0)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Основною розрахунковою формулою для знаходження розсіяного циліндром поля у точці $\vec{x}_0$, що не належить циліндру, є інтегральне представлення поля, розсіяного ідеально провідним розсіювачем S :

$$j\omega \vec{E}^{\text{рас}}(\vec{x}_0) = \int_S \vec{H}^\perp(\vec{X}) \vec{\mathcal{E}}_0^{\text{en}}(\vec{X}/\vec{x}_0, \vec{p}) ds, \quad (17)$$

де $\vec{\mathcal{E}}_0^{\text{en}}(\vec{X}/\vec{x}_0, \vec{p})$ – поле допоміжного точкового електричного диполя з вектором моментом $\vec{p}$, що розташований у точці $\vec{x}_0$; $\vec{H}^\perp(\vec{X}) = \vec{n} \times \vec{H}(\vec{X})$; $\vec{n}$ – внутрішня по відношенню до S нормаль.

Оскільки радіус циліндра малий у порівнянні з довжиною хвилі і основний вклад у розсіяне цилін-

дром поле вносить його бічна поверхня, то вважається, що $S \approx L$. У випадку, коли відстань до точки спостереження $r \rightarrow \infty$, тобто точка спостереження $\bar{x}_0$ знаходиться у далекій зоні, допоміжне поле

$\bar{\epsilon}_0^{\text{en}}(\bar{X}/\bar{x}_0, \bar{p})$ має вигляд:

$$\bar{\epsilon}_0^{\text{en}}(\bar{X}/\bar{x}_0, \bar{p}) \underset{r \rightarrow \infty}{\cong} \Omega(k_0 r) \bar{\epsilon}_0^{\text{en}}(\bar{X}/\bar{r}^0, \bar{p}), \quad (18)$$

де $\Omega(k_0 r) = \frac{e^{jk_0 r}}{4\pi k_0 r}$; $\bar{p}^T = \bar{p} - \bar{r}^0(\bar{r}^0 \cdot \bar{p})$; $\bar{r}^0 = \frac{\bar{x}_0}{r} = (\alpha, \beta, \gamma)$;

$$\bar{\epsilon}_0^{\text{en}}(\bar{X}/\bar{r}^0, \bar{p}) = k_0^2 \omega \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \bar{p}^0 e^{-jk_0(\bar{r}^0 \cdot \bar{X})}; \quad r = |\bar{x}_0|.$$

З урахуванням (18) вираз (17) можна переписати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{p} \bar{E}^{\delta \hat{a} \hat{n}}(\bar{r}_0) &\approx -jk_0^2 \Omega(k_0 r) \times \\ &\times \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \int_L e^{-jk_0(\bar{r}^0 \cdot \bar{X})} (\bar{p}^0 \cdot \bar{H}^\perp(\bar{X})) ds, \end{aligned} \quad (19)$$

а враховуючи (2) $\bar{H}^\perp(\bar{X})$ на поверхні L має вигляд

$$\bar{H}^\perp(\bar{X}) = \bar{n} \times \bar{H}|_{r=a} = e^{jk_0 z \cos \theta_3} (\bar{e}_\varphi v - \bar{e}_z \mathcal{H}_\varphi)|_{r=a}. \quad (20)$$

Підставивши (15) і (16) у (20) отримаємо

$$\bar{H}^\perp(\bar{X}) = e^{jk_0 z \cos \theta_3} (\bar{e}_\varphi f_1(\varphi, \varphi_0) - \bar{e}_z f_2(\varphi, \varphi_0)); \quad (21)$$

$$\text{де } f_1(\varphi, \varphi_0) = v|_{r=a} = \sum_{m=0}^{\infty} \tilde{A}_m \cos[m(\varphi - \varphi_0)]; \quad (22)$$

$$\begin{aligned} f_2(\varphi, \varphi_0) = \mathcal{H}_\varphi|_{r=a} &= \sum_{m=0}^{\infty} (\tilde{B}_m \cos[m(\varphi - \varphi_0)] + \\ &+ \tilde{C}_m \sin[m(\varphi - \varphi_0)]); \end{aligned} \quad (23)$$

$$\tilde{A}_m = q_3 \epsilon_m (-j)^m \left[J_m(k'a) - \frac{J_m'(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)} H_m^{(1)}(k'a) \right];$$

$$\begin{aligned} \tilde{B}_m &= \frac{-p_3}{j \sin \theta_3} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \epsilon_m (-j)^m \times \\ &\times \left[J_m'(k'a) - \frac{J_m(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)} H_m^{(1)'}(k'a) \right]; \\ \tilde{C}_m &= \frac{q_3 \cos \theta_3}{jk_0 a \sin^2 \theta_3} \epsilon_m (-j)^m \times \\ &\times m \left[J_m(k'a) - \frac{J_m'(k'a)}{H_m^{(1)'}(k'a)} H_m^{(1)}(k'a) \right]. \end{aligned}$$

З урахуванням (20) – (23) інтеграл I по поверхні циліндра у (19) набуває вигляду:

$$I = a I_z I_\varphi, \quad (24)$$

де a – радіус циліндра;

$$I_z = \int_{-b}^b e^{jk_0 z (\cos \theta_3 - \gamma)} dz = 2 \frac{\sin[k_0 b (\cos \theta_3 - \gamma)]}{k_0 (\cos \theta_3 - \gamma)}, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} I_\varphi = \int_0^{2\pi} e^{-jk_0 a (\alpha \cos \varphi + \beta \sin \varphi)} &\left[(\bar{p}^T \cdot \bar{e}_\varphi) f_1(\varphi, \varphi_0) - \right. \\ &\left. - (\bar{p}^T \cdot \bar{e}_z) f_2(\varphi, \varphi_0) \right] d\varphi. \end{aligned} \quad (26)$$

Таким чином, отримані вирази, що дозволяють розраховувати поле в дальній зоні, розсіяне довгим ідеально провідним циліндром.

Результати розрахунків. На рис. 6 наведені порівняльні результати розрахунків ЕПР циліндра завдовжки 1 м і радіусом 0,005 м. Жирна лінія відповідає ЕПР циліндра, розрахованій за допомогою фізичної оптики, тонка лінія відповідає ЕПР циліндра, розрахованій по запропонованому методу. Порівняльний аналіз кривих показує хороший збіг результатів розрахунків, особливо це стосується якісної поведінки кривих. Різниця в результатах пояснюється нездатністю методу фізичної оптики коректно розраховувати вторинне випромінювання об'єктів резонансних розмірів.

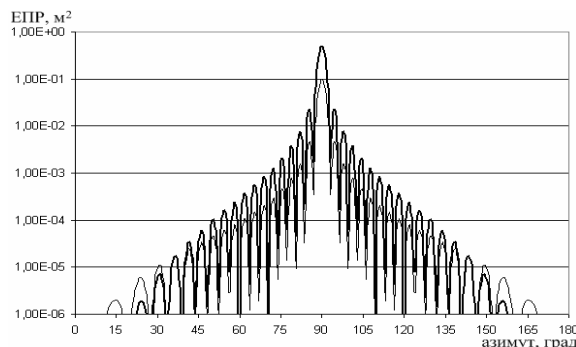


Рис. 6. Діаграма ЕПР ідеально провідного циліндру

Для отримання ЕПР машини АЦП РЛС П-18 проводиться підсумовування полів всіх елементів-циліндрів БА, розрахованих запропонованим методом і полів фрагментів корпусу автомобіля Урал-375Д, отриманих методом розрахунку поля, розсіяного об'єктом, який має протяжні ділянки поверхні.

Розрахунок ЕПР машини АЦП РЛС П-18 проводиться для частоти випромінювання зонduючого сигналу 10 ГГц, кути зондування γ відносно підстиляючої поверхні – 1° , 10° , 30° з параметрами сухого суглинку (відносна діелектрична проникність $\epsilon = 3 + j0,4$). Крок зміни азимута зондування 1° , азимут відлічується від носового ракурсу (0° – зондування з фронту, 180° – зондування з тилу), поляризація – горизонтальна.

На рис. 7 – 9 наведені гістограми усередненої в 15-градусних азимутних секторах некогерентної ЕПР (НЕПР) [2] моделі машини АЦП РЛС П-18. Аналіз отриманих результатів показує, що в більшості секторів азимутних кутів значення НЕПР можуть досягати різних рівнів залежно від напрямів зондування. Наприклад, для $\gamma = 1^\circ$, різниця в значеннях НЕПР коливається, в основному, від 660 м^2 до 991 м^2 ,

для $\gamma = 10^\circ$ – від 264 м^2 до 491 м^2 , для $\gamma = 30^\circ$ від 43 м^2 до 133 м^2 . Причиною таких коливань значень НЕПР є розташовані довільним чином щодо напрямку зондування ділянки поверхні корпусу автомобіля Урал-375Д і елементи БА. Разом з тим, існують діапазони азимутних напрямів, на яких спостерігаються різкі сплески значень ЕПР. Найбільша НЕПР має місце на тих напрямках зондування, для яких максимальна кількість практично плоских ділянок і прямолінійних кромок, що апроксимують поверхню об'єкту, а також створюючих елементів БА ортогонального напрямку зондування. Таким напрямкам, для яких НЕПР набуває максимальних значень, як видно з рис. 7 – 9, відповідають околиці азимутних кутів 0° , 90° і 180° , тобто напрямки зондування «в лоб, в бік і в корму».

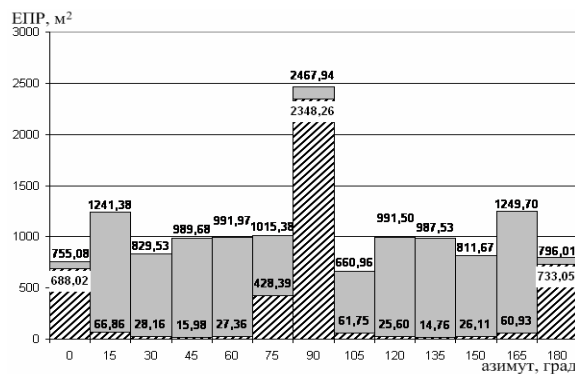


Рис. 7. Усереднена НЕПР моделі машини АЦП РЛС П-18 та автомобіля Урал-375Д, $\gamma = 1^\circ$

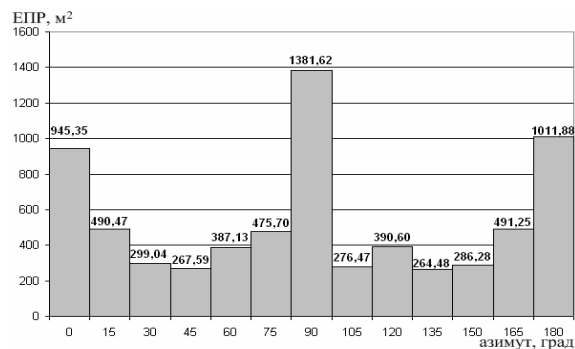


Рис. 8. Усереднена НЕПР моделі машини АЦП РЛС П-18, $\gamma = 10^\circ$

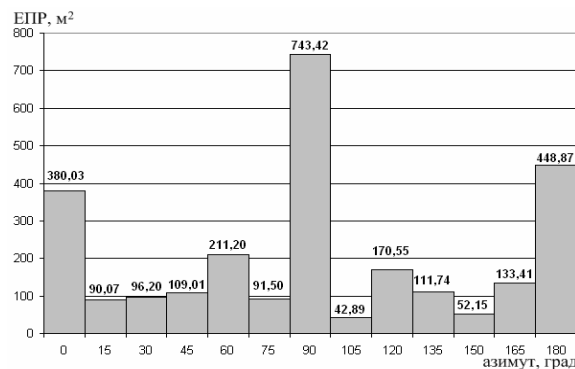


Рис. 9. Усереднена НЕПР моделі машини АЦП РЛС П-18, $\gamma = 30^\circ$

При збільшенні кута місця зондування з $\gamma = 1^\circ$ до $\gamma = 30^\circ$ спостерігається зниження середнього рівня значень НЕПР. Це відбувається унаслідок того, що із збільшенням γ одночасно зменшується кількість елементів і площа поверхні машини АЦП, які завдяки своєму розташуванню забезпечують максимально можливе перевідбиття падаючої хвилі у напрямі зондування.

Порівняльний аналіз НЕПР на рис. 7 показує, що на неосновних напрямках азимутних кутів зондування (окрім кутів 0° , 90° і 180°) усереднена НЕПР машини АЦП РЛС П-18 (сірі стовпці) значно вище усередненої НЕПР автомобіля Урал-375Д (заштриховані стовпці), тобто основний внесок в рівень розсіяного поля, в даному випадку, вносить БА. Відповідні значення усередненої НЕПР залежно від ракурсу зондування відрізняються від 2,4 до 67 разів.

Висновки

1. Розроблена модель поверхні автомобіля Урал-375Д з використанням методу апроксимації поверхні ділянками еліпсоїдів і локальними ділянками розсіяння крайкового типу.

2. Розроблений метод розрахунку ЕПР наземного об'єкту, що має у складі БА. Метод заснований на комбінованому використанні методу розрахунку ЕПР наземного об'єкту, що дозволяє знаходити поле, розсіяне ділянками корпусу більш великих розмірів, чим довжина зондувальної хвилі і методу розрахунку поля, розсіяного окремим елементом резонансних розмірів у вигляді циліндра.

3. Проведені розрахунки ЕПР моделі машини АЦП РЛС П-18 для всього азимутного діапазону і кутів місця зондування $\gamma = 1^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\gamma = 30^\circ$. Результати розрахунків показали, що НЕПР може набувати різних значень залежно від напрямів зондування. Максимальних значень НЕПР досягає в напрямках зондування, відповідних околицям азимутних кутів 0° , 90° і 180° . Із збільшенням γ знижується середній рівень значень НЕПР, що є наслідком зменшення кількості елементів, які вносять основний внесок до рівня розсіяного поля.

4. Основний внесок в рівень поля, розсіяного машиною АЦУ, вносить БА. Залежно від ракурсу зондування на БА доводиться від 58 % до 98% відбитого поля.

5. Запропонований метод розрахунку ЕПР наземного об'єкту з БА дозволяє розраховувати ЕПР різних наземних об'єктів, що володіють довільною формою поверхні і мають типові БА. Отримана за допомогою даного методу інформація може бути використана для обґрунтування необхідної РЛП типових наземних об'єктів.

Література

1. Мосалёв В. Радиолокационные станции разведки наземных движущихся целей / В. Мосалёв // *Зарубежное военное обозрение*. – 2000. – № 10. – С. 3-4.

2. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец [и др.]; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУ ПС, 2009. – 468 с.

3. Эффективная поверхность рассеяния объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.А. Горелышев [и др.] // *Зарубежная радиоэлектроника*. – 2001. – № 6. – С. 41-48.

4. Белевицук Я.О. Розрахунок ефективної поверхні розсіяння бойової машини зенітного гарматно-ракетного комплексу «Тунгуска» з використанням радіопоглинаючих матеріалів та інженерних устаткувань позицій / Я.О. Белевицук // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НІУ, 2009. – Вип. 1 (9). – С. 32-35.

5. Метод расчета ЭПР наземного объекта с не-

идеально отражающей поверхностью / О.И. Сухаревский, В.А. Василец [и др.] // *Рассеяние электромагнитных волн*. – Таганрог: ТГРУ, 2003. – Вып. 12. – С. 9-15.

6. Расчет рассеяния электромагнитной волны на идеально проводящем объекте, частично покрытом радиопоглощающим материалом с помощью триангуляционных кубатурных формул / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, А.З. Сазонов, [и др.] // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 47-54.

7. Василец В.А. Снижение средней эффективной поверхности рассеяния объекта сложной формы при оптимальном распределении ограниченного количества радиопоглощающего материала на его поверхности / В.А. Василец // *Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2002. – Вып. 129. – С. 69-72.

8. Белевицук Я.О. Застосування ідеально відбиваючих панелей і радіопоглинаючих покриттів для зниження радіолокаційної помітності наземної техніки позицій / Я.О. Белевицук // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУ ПС, 2009. – Вип. 3 (77). – С. 6-9.

9. Подвижная радиолокационная станция П-18. – М.: Воениздат, 1978. – 320 с.

Надійшла до редакції 15.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна.

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ, ОСНАЩЕННОЙ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ АНТЕННАМИ

Я.А. Белевицук, В.А. Василец, С.В. Нечитайло

Разработана модель поверхности автомобиля Урал-375Д радиолокационной станции П-18. Разработан метод расчета эффективной поверхности рассеяния наземного объекта, имеющего в составе многоэлементную антенну. Метод основан на комбинированном использовании метода расчета эффективной поверхности рассеяния наземного объекта, позволяющего находить поле, рассеянное участками корпуса много больших размеров, чем длина зондирующей волны и метода расчета поля, рассеянного отдельным элементом резонансных размеров в виде цилиндра. Проведены расчеты эффективной поверхности рассеяния машины АМУ РЛС П-18 и проанализированы их результаты в зависимости от ракурса зондирования.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, многоэлементная антенна.

METHOD OF CALCULATION OF THE EFFECTIVE SURFACE OF DISPERSION OF THE LAND TECHNICS EQUIPPED WITH MULTIELEMENT AERIALS

Y.A. Belevshchuk, V.A. Vasilets, S.V. Nechitaylo

The model of a surface of the car Ural-375D radar station P-18 is developed. The method of calculation of an effective surface of dispersion of the land object having in structure the multielement aerial is developed. The method is based on combined use of a method of calculation of an effective surface of dispersion of the land object, allowing to find the field disseminated by sites of the case many bigs of the sizes, than length of a probing wave and a method of calculation of the field disseminated by a separate element of the resonant sizes in the form of the cylinder. Calculations of an effective surface of dispersion of car AMU of radar station P-18 are carried out and their results depending on a sounding foreshortening are analysed.

Keywords: an effective surface of dispersion, the multielement aerial.

Белевицук Ярослав Олександрович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник НДВ НЦ ПС Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна.

Василець Віталій Олексійович – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник НДВ НЦ ПС Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна.

Нечитайло Сергій В'ячеславович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник НДВ НЦ ПС Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна.