

УДК 621.396.96

М.В. Сургай, Г.С. Залевський, В.О. Василець, О.І. Сухаревський

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

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПОМІТНОСТІ СНАРЯДУ РАКЕТНОЇ СИСТЕМИ ЗАЛПОВОГО ВОГНЮ "ГРАД" У РІЗНИХ ДІАПАЗОНАХ ДОВЖИН ХВИЛЬ

За допомогою методів математичного моделювання отримано значення ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) 122-міліметрового снаряду 9М22 ракетної системи залпового вогню (РСЗВ) "Град" у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль, для різних ракурсів об'єкта, на горизонтальній і вертикальній поляризації. Величина ЕПР характеризує рівень радіолокаційної помітності снаряду при застосуванні радіолокаційних станцій (РЛС) контрбатареїної боротьби (КББ), що функціонують у різних частотних діапазонах. Отримані результати доцільно використовувати для оцінювання можливостей існуючих РЛС КББ, а також на етапі створення перспективного радіолокатора.

Ключові слова: вторинне випромінювання, методи математичного моделювання, радіолокаційна станція контрбатареїної боротьби, радіолокаційний об'єкт, снаряд.

Вступ

Активне застосування артилерії, РСЗВ та мінометів у сучасних війнах і збройних конфліктах призводить до постійного підвищення вимог до систем протидії зазначеним засобам ураження [1–2]. На даному етапі розвитку озброєння для вирішення задач виявлення пусків снарядів (мін) систем різних типів, завчасного визначення місць їх падіння і місць розташування пускових засобів найбільш широкое застосування знаходять радіолокаційні засоби (РЛС КББ) [1–4]. Застосування радіолокаційного методу потенційно дозволяє не тільки здійснювати виявлення і достатньо точно супроводження траєкторій снарядів (мін), а крім того й розпізнавання їх типів [3; 5; 6]. Відомі РЛС, що залучаються до КББ [3; 7–17], застосовують зондувальні сигнали, що відповідають дециметровому, сантиметровому і міліметровому діапазонам довжин хвиль. Середня довжина хвилі РЛС обирається виходячи з максимальної дальності дії, яку потрібно забезпечити, а також відповідно до вимог щодо характеристик точності визначення координат і масогабаритних розмірів радіолокатора [18]. Крім того від довжини хвилі суттєво залежить інтенсивність вторинного випромінювання радіолокаційних цілей, що характеризується їх ЕПР, і також суттєво впливає на точність супроводження цілей [18–19]. Разом з цим інформація про ЕПР снарядів у різних діапазонах довжин хвиль у відомій літературі відсутня.

На етапі створення вітчизняної перспективної РЛС КББ доцільно визначити полосу частот, якій відповідають максимальні значення ЕПР снарядів різних типів. У даний час для визначення рівня вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів застосовуються методи математичного моделювання [18–26]. Зокрема для розрахунку ЕПР снарядів

можуть бути застосованими електродинамічні методи, описані у роботах [21–26]. Зазначені методи пройшли верифікацію із даними фізичних експериментів і дозволяють отримувати достовірні дані про характеристики вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів резонансних [23–26] і великих електричних [21–23] розмірів при заданих поляризації, просторових і часово-частотних параметрах зондувального сигналу.

Враховуючи зазначене вище, метою даної статті є визначення ЕПР 122-міліметрового осколково-фугасного реактивного снаряду 9М22 РСЗВ "Град" у різних діапазонах довжин хвиль, на двох ортогональних поляризаціях зондувальної хвилі, шляхом застосування методів математичного моделювання.

Виклад основного матеріалу

1. Методи розрахунку характеристик вторинного випромінювання, що використовуються

Вибір методу розрахунку характеристик вторинного випромінювання залежить від електричних розмірів радіолокаційного об'єкту і складності форми його поверхні. Снаряд 9М22 (рис. 1) має довжину 2,87 м, діаметр 0,122 м, розмах стабілізаторів 0,25 м [27]. Тому даний об'єкт слід розглядати як об'єкт резонансних розмірів (резонансний розсіювач) у метровому і дециметровому діапазонах довжин хвиль та як розсіювач великих електричних розмірів у сантиметровому діапазоні. Поверхня снаряду має як гладкі ділянки (корпус снаряду), так і електрично тонкі частини з краями (стабілізатори).

Враховуючи зазначене вище, для розрахунку характеристик вторинного випромінювання снаряду, що розглядається, у метровому і дециметровому діапазонах, як об'єкту резонансних розмірів, у даній роботі застосовується метод розрахунку, заснований

на розв'язанні інтегрального рівняння магнітного поля для розрахунку щільності електричного струму на поверхні ідеально провідного об'єкту, після чого компоненти електромагнітного (ЕМ) поля, розсіяного об'єктом, обчислюються за допомогою інтегралу типу Кірхгоффа [23–26]. У чисельному методі реалізовано спеціальні алгоритми, що дозволяють з високою точністю розраховувати характеристики вторинного випромінювання повітряних радіолокаційних об'єктів із ідеально провідною поверхнею, що складається із ділянок, яким відповідають різні кривизни – достатньо гладких частин і елементів з краями. Метод, що обговорюється, має ряд переваг у порівнянні із іншими відомими методами при розрахунку характеристик вторинного випромінювання резонансних радіолокаційних об'єктів складної форми, до основних з яких відносяться досить швидка збіжність чисельного алгоритму і порівняно менший об'єм комп'ютерної пам'яті, що використовується [23–26].

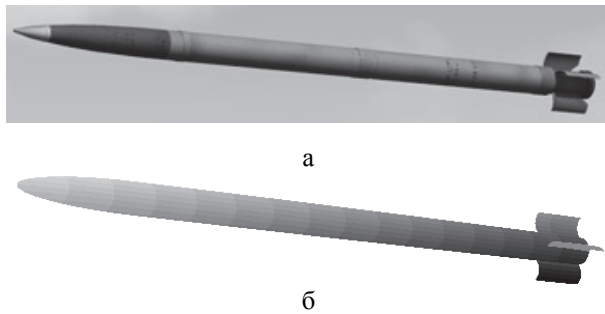


Рис. 1. Зовнішній вигляд (а) і комп'ютерна модель поверхні (б) снаряду 9М22

Недоліком розрахункового методу, що використовується, як і інших методів, заснованих на розв'язанні інтегральних рівнянь, є обмеження на електричні розміри радіолокаційного об'єкту. Разом із збільшенням електричних розмірів розсіювача зростає об'єм необхідної комп'ютерної пам'яті і як наслідок час обчислень [19–20; 23–26]. Від цього недоліку вільні високочастотні асимптотичні методи, точність яких зростає при збільшенні електричних розмірів, і які не потребують використання значних об'ємів комп'ютерної пам'яті [18–23].

Тому для розрахунку характеристик вторинного випромінювання снаряду 9М22 у сантиметровому діапазоні, як об'єкту великих електричних розмірів у даній роботі застосовується високочастотний асимптотичний метод, детально описаний у роботах [21–23]. Даний метод дозволяє з високою точністю розраховувати характеристики вторинного випромінювання електрично великих повітряних радіолокаційних об'єктів складної форми, ідеально провідна поверхня яких частково або повністю покрита радіопоглинаючим матеріалом. Метод передбачає [21–23] роздільне обчислення вкладів гладкої поверхні і елементів з краями у розсіяне об'єктом ЕМ поле,

розв'язання класичної задачі довільного падіння плоскої ЕМ хвилі на ідеально провідний край з циліндричним поглинаючим покриттям на ньому, оцінювання інтеграла типу Кірхгоффа для розсіяного ЕМ поля з використанням методу стаціонарної фази.

Запропонований метод має ряд переваг при розрахунку електрично великих радіолокаційних об'єктів складної форми у порівнянні із іншими відомими високочастотними асимптотичними методами [18–20], зокрема при розрахунку розсіювання ЕМ хвиль на елементах поверхні з краями, у тому числі частково або повністю покритими радіопоглинаючим матеріалом [21–22].

Для чисельної реалізації запропонованих методів розрахунку характеристик вторинного випромінювання резонансних і електрично великих радіолокаційних об'єктів використовуються спеціально розроблені методи створення моделі поверхні розсіювача, які враховують особливості кожного з чисельних алгоритмів. В їх основу покладена апроксимація поверхні об'єкта ділянками еліпсоїдів. Зокрема модель поверхні снаряду 9М22 зображена на рис. 1, б.

Методи, що використовуються у роботі, пройшли верифікацію із даними фізичних експериментів і результатами розрахунку, отриманими за допомогою інших відомих методів, для ряду модельних порівняно простих розсіювачів [21; 25–26], що свідчить про достатньо високу точність розрахунку характеристик вторинного випромінювання. Далі у роботі демонструються результати розрахунку ЕПР снаряду 9М22 у різних частотних діапазонах.

2. Результати розрахунку ЕПР снаряду 9М22 РСЗВ "Град"

За допомогою описаних у попередньому розділі чисельних методів проведено розрахунок моностатичної ЕПР σ_c снаряду 9М22 для заданих:

- ракурсів снаряду у азимутальній і кутомісній площинах, які характеризуються кутами β_c , ε_c відповідно (значення β_c , $\varepsilon_c = 0$ відповідають носовому ракурсу – зондуванню вздовж осі снаряду, спереду, а $\beta_c = 90$ град. відповідає боковому ракурсу – зондуванню у напрямку, ортогональному осі снаряду);

- частоти зондувального сигналу $f_{\text{зонд}}$ (довжини ЕМ хвилі);

- поляризації зондувального сигналу (горизонтальній поляризації (ГП) відповідає зондувальний сигнал, вектор напруженості електричного поля $\vec{E}_{\text{зонд}}$ якого лежить у азимутальній площині; при вертикальній поляризації (ВП) $\vec{E}_{\text{зонд}}$ орієнтований у кутомісній площині, перпендикулярно напрямку суміщених зондування і прийому).

Кут β_c при розрахунках змінювався із кроком 0,1 град. Кожному фіксованому значенню β_c відпові-

дав випадковий кут місця, розподілений за рівномірним законом у діапазоні $\epsilon_c \pm 4$ град., а ϵ_c приймав дискретні значення від 0 до 40 град. із кроком 10 град.

На рис. 2–5 зображено розраховані діаграми зворотного вторинного випромінювання (ДЗВВ) – залежності ЕПР (σ) снаряду 9М22 від азимутального кута β_c , при $\epsilon_c=10$ град., на різних частотах і на двох ортогональних поляризаціях (чорна тонка лінія – ГП, сіра жирна – ВП).

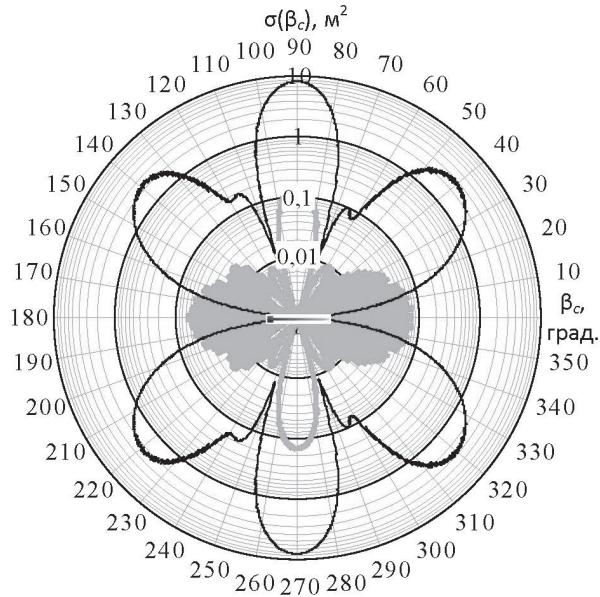


Рис. 2. ДЗВВ снаряду 9М22 на частоті 0,167 ГГц

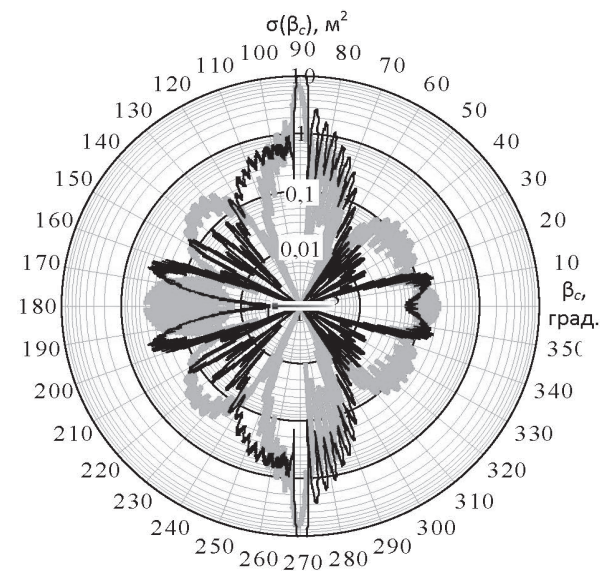


Рис. 3. ДЗВВ снаряду 9М22 на частоті 1 ГГц

Середні і медіанні значення ЕПР снаряду 9М22 у головних ракурсах опромінення, на різних частотах, на двох ортогональних поляризаціях зондувального сигналу представлено у табл. 1–4.

Проаналізуємо вплив ракурсу снаряду відносно РЛС, частотного діапазону і поляризації зондувального сигналу на величину ЕПР снаряду.

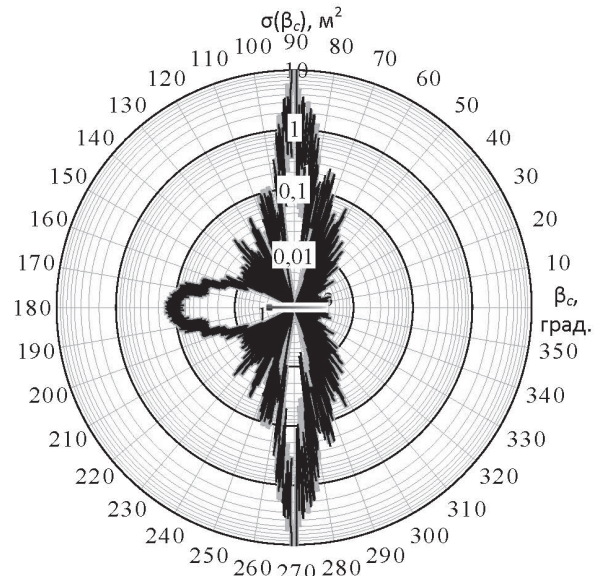


Рис. 4. ДЗВВ снаряду 9М22 на частоті 3 ГГц

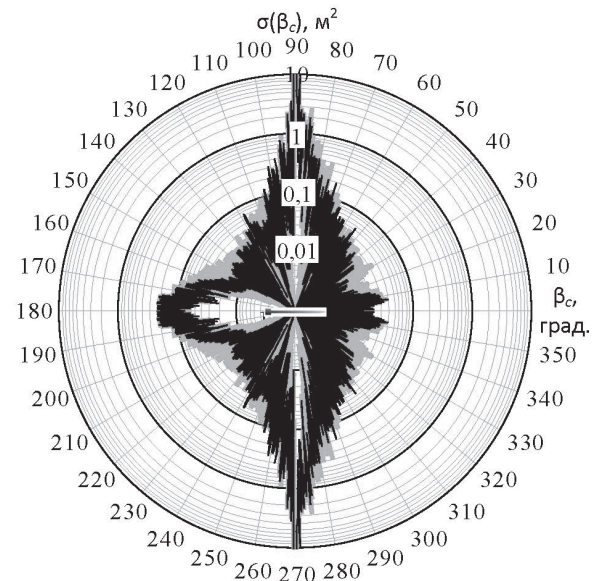


Рис. 5. ДЗВВ снаряду 9М22 на частоті 10 ГГц

З рис. 2–5 видно, що ширина пелюсток ДЗВВ снаряду, як і очікувалось, залежить від електричного розміру розсіювача. У всіх розглянутих випадках максимальні значення ЕПР снаряду відповідають боковому ракурсу:

$\sigma_{ГП}=8,14 \text{ м}^2$ на ГП і $\sigma_{ВП}=3,01 \text{ м}^2$ на ВП, при $f_{зонд}=0,167 \text{ ГГц}$;

$\sigma_{ГП}=17,3 \text{ м}^2$, $\sigma_{ВП}=3,01 \text{ м}^2$, при $f_{зонд}=1 \text{ ГГц}$;

$\sigma_{ГП}=36,6 \text{ м}^2$, $\sigma_{ВП}=30,9 \text{ м}^2$, при $f_{зонд}=3 \text{ ГГц}$;

$\sigma_{ГП}=73,1 \text{ м}^2$, $\sigma_{ВП}=67,4 \text{ м}^2$, при $f_{зонд}=10 \text{ ГГц}$.

Таблиця 1

Середні значення ЕПР снаряду 9М22 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ГП

| Азимутальний сектор $\Delta\beta_{\text{с}}$, град. | Середнє значення ЕПР, м ² | | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $f_{\text{зонд}}$, ГГц | | | |
| | 0,167 | 1 | 3 | 10 |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=0$ | | | | |
| 0...45 | 1,05 | $5,78 \times 10^{-2}$ | $1,84 \times 10^{-3}$ | $6,39 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 1,87 | 0,767 | 0,411 | 0,403 |
| 135...180 | 0,848 | 0,122 | $4,99 \times 10^{-2}$ | $5,20 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=10$ град. | | | | |
| 0...45 | 1,01 | $4,34 \times 10^{-2}$ | $1,41 \times 10^{-3}$ | $6,64 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 1,83 | 0,77 | 0,509 | 0,354 |
| 135...180 | 0,823 | $7,61 \times 10^{-2}$ | $3,23 \times 10^{-2}$ | $4,03 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=20$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,835 | $3,47 \times 10^{-2}$ | $3,25 \times 10^{-3}$ | $7,31 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 1,76 | 0,614 | 0,394 | 0,451 |
| 135...180 | 0,674 | $3,10 \times 10^{-2}$ | $9,47 \times 10^{-3}$ | $1,54 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=30$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,527 | $6,02 \times 10^{-2}$ | $2,94 \times 10^{-3}$ | $7,95 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 1,76 | 0,523 | 0,395 | 0,404 |
| 135...180 | 0,417 | $5,55 \times 10^{-2}$ | $4,4 \times 10^{-3}$ | $9,18 \times 10^{-3}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=40$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,196 | $9,20 \times 10^{-2}$ | $3,65 \times 10^{-3}$ | $7,6 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 1,93 | 0,576 | 0,592 | 0,548 |
| 135...180 | 0,143 | 0,108 | $5,55 \times 10^{-3}$ | $7,34 \times 10^{-3}$ |

Таблиця 2

Середні значення ЕПР снаряду 9М22 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ВП

| Азимутальний сектор $\Delta\beta_{\text{с}}$, град. | Середнє значення ЕПР, м ² | | | |
|--|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $f_{\text{зонд}}$, ГГц | | | |
| | 0,167 | 1 | 3 | 10 |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=0$ | | | | |
| 0...45 | $1,12 \times 10^{-3}$ | 0,105 | $1,84 \times 10^{-3}$ | $1,21 \times 10^{-2}$ |
| 45...135 | $2,97 \times 10^{-2}$ | 0,521 | 0,361 | 0,386 |
| 135...180 | $9,54 \times 10^{-4}$ | 0,967 | $4,99 \times 10^{-2}$ | $5,74 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=10$ град. | | | | |
| 0...45 | $1,53 \times 10^{-2}$ | 0,101 | $1,41 \times 10^{-3}$ | $1,01 \times 10^{-2}$ |
| 45...135 | $3,11 \times 10^{-2}$ | 0,376 | 0,452 | 0,334 |
| 135...180 | $1,29 \times 10^{-2}$ | 0,127 | $3,23 \times 10^{-2}$ | $4,33 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=20$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,214 | $2,26 \times 10^{-2}$ | $3,25 \times 10^{-3}$ | $6,9 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $3,63 \times 10^{-2}$ | 0,259 | 0,333 | 0,432 |
| 135...180 | 0,170 | $9,48 \times 10^{-2}$ | $9,47 \times 10^{-3}$ | $1,55 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=30$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,854 | $1,73 \times 10^{-2}$ | $2,94 \times 10^{-3}$ | $5,08 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $4,20 \times 10^{-2}$ | 0,376 | 0,335 | 0,379 |
| 135...180 | 0,689 | $5,93 \times 10^{-2}$ | $4,4 \times 10^{-3}$ | $7,13 \times 10^{-3}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=40$ град. | | | | |
| 0...45 | 1,43 | $3,58 \times 10^{-2}$ | $3,65 \times 10^{-3}$ | $5,36 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $4,17 \times 10^{-2}$ | 0,575 | 0,539 | 0,515 |
| 135...180 | 1,22 | $3,94 \times 10^{-2}$ | $5,55 \times 10^{-3}$ | $5,55 \times 10^{-3}$ |

Таблиця 3

Медіанні значення ЕПР снаряду 9М22 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ГП

| Азимутальний сектор $\Delta\beta_{\text{с}}$, град. | Медіанне значення ЕПР, м ² | | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $f_{\text{зонд}}$, ГГц | | | |
| | 0,167 | 1 | 3 | 10 |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=0$ | | | | |
| 0...45 | 0,559 | $1,72 \times 10^{-2}$ | $1,41 \times 10^{-3}$ | $3,56 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 0,782 | 0,174 | $1,35 \times 10^{-2}$ | $2,55 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,400 | $4,17 \times 10^{-2}$ | $1,57 \times 10^{-2}$ | $2,07 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=10$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,584 | $1,47 \times 10^{-2}$ | $1,11 \times 10^{-3}$ | $4,34 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 0,677 | 0,204 | $1,59 \times 10^{-2}$ | $2,38 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,435 | $3,15 \times 10^{-2}$ | $1,27 \times 10^{-2}$ | $1,67 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=20$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,583 | $2,54 \times 10^{-2}$ | $1,84 \times 10^{-3}$ | $6,73 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 0,478 | 0,112 | $1,41 \times 10^{-2}$ | $2,37 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,436 | $2,40 \times 10^{-2}$ | $5,54 \times 10^{-3}$ | $9,37 \times 10^{-3}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=30$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,473 | $5,41 \times 10^{-2}$ | $1,67 \times 10^{-3}$ | $6,20 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 0,259 | $5,93 \times 10^{-2}$ | $1,32 \times 10^{-2}$ | $2,14 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,366 | $4,73 \times 10^{-2}$ | $3,51 \times 10^{-3}$ | $5,9 \times 10^{-3}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=40$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,167 | $8,89 \times 10^{-2}$ | $2,02 \times 10^{-3}$ | $4,50 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | 0,152 | $7,96 \times 10^{-2}$ | $3,07 \times 10^{-2}$ | $1,70 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,119 | $7,70 \times 10^{-2}$ | $4,23 \times 10^{-3}$ | $4,41 \times 10^{-3}$ |

Таблиця 4

Медіанні значення ЕПР снаряду 9М22 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ВП

| Азимутальний сектор $\Delta\beta_{\text{с}}$, град. | Медіанне значення ЕПР, м ² | | | |
|--|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $f_{\text{зонд}}$, ГГц | | | |
| | 0,167 | 1 | 3 | 10 |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=0$ | | | | |
| 0...45 | $6,23 \times 10^{-4}$ | 0,102 | $1,41 \times 10^{-3}$ | $1,10 \times 10^{-2}$ |
| 45...135 | $5,73 \times 10^{-3}$ | 0,190 | $1,37 \times 10^{-2}$ | $2,15 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | $4,52 \times 10^{-4}$ | $4,69 \times 10^{-2}$ | $1,57 \times 10^{-2}$ | $3,19 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=10$ град. | | | | |
| 0...45 | $8,63 \times 10^{-3}$ | $9,73 \times 10^{-2}$ | $1,11 \times 10^{-3}$ | $8,55 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $7,28 \times 10^{-3}$ | $9,79 \times 10^{-2}$ | $1,59 \times 10^{-2}$ | $2,07 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | $9,19 \times 10^{-3}$ | 0,111 | $1,27 \times 10^{-2}$ | $2,52 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=20$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,174 | $1,69 \times 10^{-2}$ | $1,84 \times 10^{-3}$ | $5,35 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $1,37 \times 10^{-2}$ | $2,89 \times 10^{-2}$ | $1,50 \times 10^{-2}$ | $2,19 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,134 | $8,04 \times 10^{-2}$ | $5,54 \times 10^{-3}$ | $1,37 \times 10^{-2}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=30$ град. | | | | |
| 0...45 | 0,835 | $9,38 \times 10^{-3}$ | $1,67 \times 10^{-3}$ | $4,26 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $1,86 \times 10^{-2}$ | $4,92 \times 10^{-2}$ | $1,31 \times 10^{-2}$ | $1,69 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 0,656 | $5,83 \times 10^{-2}$ | $3,51 \times 10^{-3}$ | $6,56 \times 10^{-3}$ |
| Кут місця $\epsilon_{\text{с}}=40$ град. | | | | |
| 0...45 | 1,37 | $1,95 \times 10^{-2}$ | $2,02 \times 10^{-3}$ | $4,50 \times 10^{-3}$ |
| 45...135 | $1,43 \times 10^{-2}$ | $9,66 \times 10^{-2}$ | $3,04 \times 10^{-2}$ | $1,70 \times 10^{-2}$ |
| 135...180 | 1,22 | $3,34 \times 10^{-2}$ | $4,23 \times 10^{-3}$ | $4,41 \times 10^{-3}$ |

Найбільш суттєва різниця у ДЗВВ снаряду на двох ортогональних поляризаціях спостерігається при частотах 0,167 ГГц і 1 ГГц (рис. 2–3). При збільшенні частоти (збільшенні електричних розмірів елементів конструкції снаряду) ДЗВВ на ГП та ВП якісно співпадають (рис. 4–5).

При зміні кута місця опромінення снаряду ϵ_c від 0 до 40 град. розподіл ЕПР за азимутом змінюється несуттєво. З даних, наведених у табл. 1–4, видно, що найбільші значення середніх і медіанних ЕПР снаряду отримані при куті місця $\epsilon_c=0^0, 10^0, 40^0$, а найменші при $\epsilon_c=20^0, 30^0$ на всіх частотах зондування.

Найбільші значення середньої і медіанної ЕПР снаряду відповідають боковому ракурсу, оскільки саме у цьому випадку площа поверхні снаряду, яка приймає участь у радіолокаційному розсіюванні найбільша.

З табл. 1 видно, що для практично важливого носового ракурсу на ГП значення середніх ЕПР на частотах 0,167 ГГц і 1 ГГц перевищують аналогічні значення на частотах 3 ГГц і 10 ГГц на порядок. Максимальні значення середньої ЕПР снаряду при носовому ракурсі на ГП відповідають $f_{зонд}=0,167$ ГГц. При ВП (табл. 2) максимальні значення середньої ЕПР снаряду для носового ракурсу відповідають $f_{зонд}=1$ ГГц при малих кутах ϵ_c (0, 10 град.) і $f_{зонд}=0,167$ ГГц при більших ϵ_c (20, 30, 40 град.). При збільшенні частоти ЕПР у носовому ракурсі зменшується також на порядок.

Порівняння даних, наведених у табл. 1–4, показують, що розподіл значень середніх і медіанних ЕПР розсіювача, що розглядається, в залежності від частоти, поляризації, азимутальних і кутomisних ракурсів якісно співпадає.

З аналізу наведених у табл. 1–4 даних можна зробити наступні важливі практичні висновки.

Зондування снаряду 9М22 радіолокаційним сигналом ГП має певний енергетичний вигравш.

Середні і медіанні ЕПР снаряду при боковому ракурсі приймають значення, на порядок менші за ЕПР крилатих ракет на розглянутих частотах.

Найбільші значення середніх і медіанних ЕПР снаряду на обох поляризаціях, при носовому ракурсі відповідають у основному частотам 0,167 ГГц і 1 ГГц. При подальшому збільшенні частоти ЕПР зменшується у рази.

Враховуючи обмеження на розміри антенних систем РЛС КББ (які збільшуються з ростом довжини хвилі), для забезпечення високої точності вимірювання кутових координат, середню частоту зондувального сигналу для виявлення і супроводження траєкторії розглянутого снаряду доцільно обирати близькою до 1 ГГц.

Далі на рис. 6–9 зображено отримані закони розподілу амплітудного множника $\sqrt{\sigma}$ сигналу, відбитого снарядом у різних частотних діапазонах.

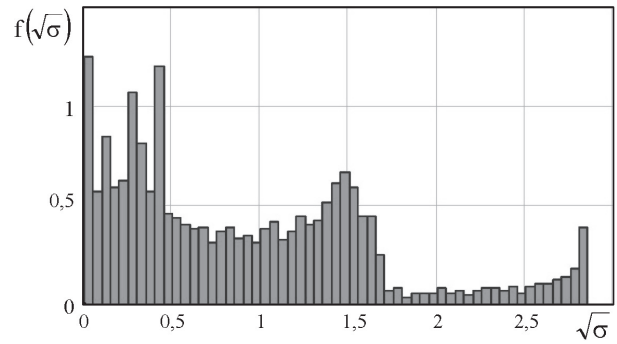


Рис. 6. Гістограма розподілу амплітудного множника сигналу, відбитого снарядом 9М22, при $f_{зонд}=0,167$ ГГц та ГП

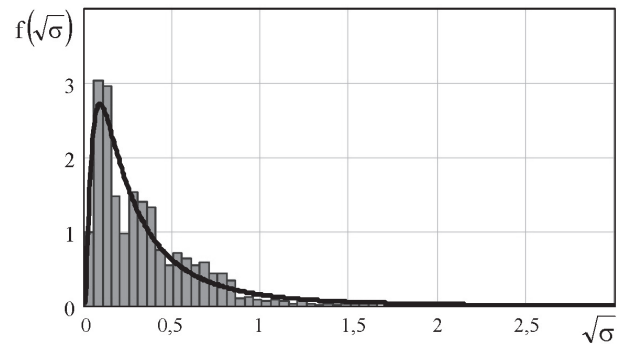


Рис. 7. Гістограма розподілу амплітудного множника сигналу, відбитого снарядом 9М22, при $f_{зонд}=1$ ГГц та ГП

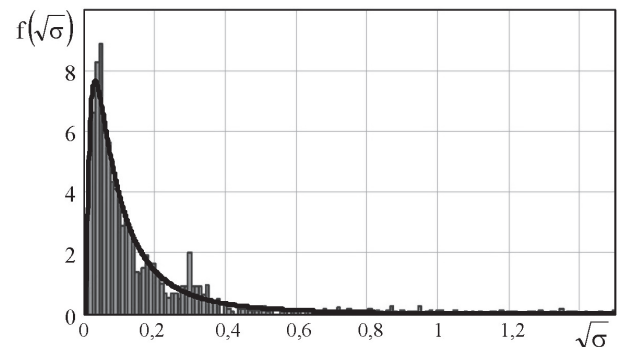


Рис. 8. Гістограма розподілу амплітудного множника сигналу, відбитого снарядом 9М22, при $f_{зонд}=3$ ГГц та ГП

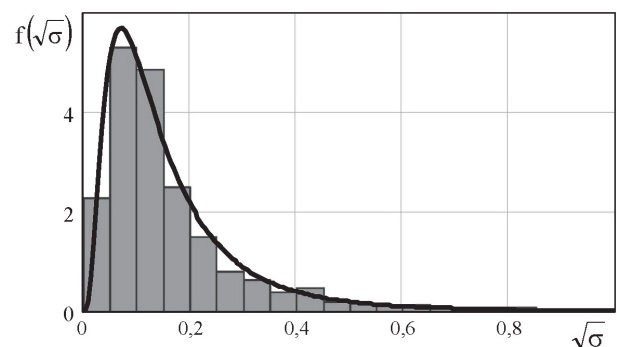


Рис. 9. Гістограма розподілу амплітудного множника сигналу, відбитого снарядом 9М22, при $f_{зонд}=10$ ГГц та ГП

Розраховані дані відповідають ГП та $\epsilon_c=10$ град. За винятком частоти $f_{\text{зона}}=0,167$ ГГц, розподіл амплітудного множника $\sqrt{\sigma}$, що розглядається, добре апроксимується логнормальним законом (теоретичні щільності імовірності на рис. 7–9 показано чорною суцільною лінією). Наведені дані мають практичний інтерес при розробці алгоритмів обробки прийнятих сигналів та наряду із даними розрахунку ЕПР в залежності від ракурсу можуть використовуватись при імітаційному моделюванні.

Висновки

У роботі за допомогою електродинамічних методів математичного моделювання отримано і проаналізовано результати розрахунку ЕПР снаряду 9М22 РСЗВ "Град" для різних частот, азимутальних і кутомірних ракурсів на двох ортогональних поляризаціях. Наведено результати розрахунку ДЗВВ і значення середніх та медіанних ЕПР снаряду для різних умов опромінення.

З аналізу даних розрахунку витікає, що зондування на ГП, має певний енергетичний вигравш у порівнянні з ВП. Значення середніх і медіанних ЕПР снаряду, відповідні носовому ракурсу, зменшуються при збільшенні частоти. Максимальні значення ЕПР снаряду при такому ракурсі відповідають частотам зондування 0,167 ГГц та 1 ГГц. Враховуючи те, що для забезпечення високої точності вимірювання куткових координат снаряду розміри антени РЛС КББ при застосуванні зондувального сигналу метрового діапазону повинні бути достатньо великими, що негативно впливає на мобільність РЛС такого типу, наведені у статті дані свідчать на користь застосування сигналу із середньою частотою, близькою до 1 ГГц (довжина хвилі 0,3 м).

Наведені дані мають значний практичний інтерес на етапі розробки вітчизняної перспективної РЛС КББ.

У подальшому доцільно оцінити характеристики вторинного випромінювання інших типів снарядів для різних умов опромінювання, що дозволить конкретизувати полосу частот зондувальних сигналів, яку доцільно використовувати у РЛС КББ для забезпечення максимальної інтенсивності відбитого сигналу.

Список літератури

1. Красюк О.П. Розвідувальне забезпечення артилерії в локальних війнах та збройних конфліктах кінця ХХ – початку ХХІ століття // О.П. Красюк / Військово-науковий вісник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – Вип. 18. – С. 339-347.
2. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних сил Російської Федерації / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов, Д.А. Гриб та ін.; за заг. ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
3. Крупников А. Радиолокационные станции контрбатареинной борьбы основных зарубежных стран /

А. Крупников // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 12. – С. 32-41.

4. Опанасюк І.І. Радіолокаційні станції контрбатареинної боротьби та перспективи їх розвитку / І.І. Опанасюк // Військово-технічний збірник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – 2015. – № 1. – С. 117-119.

5. Барабаш Ю.Л. Математична модель та результати моделювання сигнального розпізнавання й визначення координат гармат в РЛС розвідки вогневих позицій / Ю.Л. Барабаш, Г.Д. Братченко, А.А. Гончарук // Вісник Київського Національного університету імені Тараса Шевченка. – 2005. – № 10. – С. 6-10.

6. Барабаш Ю.Л. Методика та результати математичного моделювання радіолокаційного розпізнавання нарізних гармат у РЛС розвідки вогневих позицій / Ю.Л. Барабаш, Г.Д. Братченко, А.А. Гончарук // Збірник наукових праць Військового інституту Київського Національного університету імені Тараса Шевченка. – 2006. – Вип. № 2. – С. 5-10.

7. Худов Г.В. Радіолокаційні засоби розвідки позицій кочівних мінометів / Г.В. Худов, Б.А. Лісогорський, В.Я.Борюльнич // Системи озброєння і військова техніка. – 2013. – № 3 (39). – С. 68-72.

8. Лісогорський Б.А. Аналіз характеристик радіолокаційних станцій контрбатареинної боротьби / Б.А. Лісогорський, Г.В. Худов // Системи озброєння і військова техніка. – 2014. – № 4 (40). – С. 50-54.

9. Военно-исторический журнал. Радиолокационные станции Enhanced AN/TPQ-36/37 и их аналоги у нас [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://makarih-203.livejournal.com/68813.html>.

10. Оружие отечества. Легкие антимометные радарные системы LCMR AN/TPQ-48...50 (США) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bastion-opk.ru/lcmr/>.

11. The British Army. Artillery. Artillery Locating Devices - Mamba - Mobile Artillery Monitoring Battlefield Radar (Ericsson Arthur) [Electron resource]. – Access mode: <http://www.armedforces.co.uk/army/listings/10117.html>.

12. Military Russia. 1Л220/1Л220У "Зоопарк-2" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-513.html>.

13. Military Russia. 1Л219/1Л219М "Зоопарк-1" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://militaryrussia.ru/blog/topic-510.html>.

14. ОАО "Научно-производственное объединение "Стрела" [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.npostrela.com/upload/Almanax_PVO_e_RES_Rossee_2011.pdf.

15. Оружие отечества. Отечественное оружие и военная техника. Переносная РЛС разведки огневых позиций минометов 1Л271 "Аустенок" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bastion-opk.ru/1l271-aistenok/>.

16. Военное обозрение. НПО "Стрела" показало машину радиолокационной разведки СНАР-10М1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://topwar.ru/56823-npo-strela-pokazalo-mashinu-radiolokacionnoy-razvedki-snar-10m1.html>.

17. Оружие России. Модернизированный артиллерийский радиолокационный комплекс разведки и обслуживания стрельбы наземной артиллерии АРК-1М "Рысь" [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://armsdata.net/russia/0120.html>.

18. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочн. / под ред. Я.Д. Ширмана. – 2-е изд. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

19. Knott E.F. *Radar Cross Section* / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley. – 2nd ed. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.

20. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов / Л. А. Львова. – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. – 232 с.

21. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: моногр. / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУВС, 2009. – 468 с.

22. Сухаревский О.И. Математическое моделирование радиолокационных дальностных портретов воздушных объектов / О.И. Сухаревский, В.А. Василец // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2013. – Т. 56, № 11. – С. 3-15.

23. Залевский Г. С. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн / Г.С. Залевский, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 20-28.

24. Залевский Г.С. Расчет характеристик рассеяния воздушных радиолокационных объектов резонансных размеров, основанный на итерационном алгоритме / Г.С. Залевский, О.И. Сухаревский // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57, № 6. – С. 13-25.

25. *Secondary Radiation of Resonance Perfectly Conducting Objects* / G.S. Zalevsky, O.I. Sukharevsky, V.A. Vasilets, S.V. Nechitaylo // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2014. – Vol. 59, No. 12. – P. 1321-1332.

26. Sukharevsky O.I. *Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving* / O.I. Sukharevsky, G.S. Zalevsky, V.A. Vasilets; edited by J.D. Taylor // *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*. – Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Groupe, 2016. – Chapter 5. – P. 195-235.

27. Карпенко А.В. Современные реактивные системы залпового огня / А.В. Карпенко [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://bastion-karpenko.narod.ru/RSZO_sovr.pdf.

Надійшла до редколегії 4.01.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. А.В. Кобзев, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОЦЕНИВАНИЕ УРОВНЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ СНАРЯДА РАКЕТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАЛПОВОГО ОГНЯ "ГРАД" В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

М.В. Сургай, Г.С. Залевский, В.А. Василец, О.И. Сухаревский

С помощью методов математического моделирования получены значения эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) 122-миллиметрового снаряда 9М22 ракетной системы залпового огня "Град" в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах длин волн, для различных ракурсов объекта, на горизонтальной и вертикальной поляризации. Величина ЭПР характеризует уровень радиолокационной заметности снаряда при применении радиолокационных станций (РЛС) контрбатарейной борьбы (КББ), функционирующих в различных частотных диапазонах. Полученные результаты целесообразно использовать для оценивания возможностей существующих РЛС КББ, а также на этапе создания перспективного радиолокатора.

Ключевые слова: вторичное излучение, методы математического моделирования, радиолокационная станция контрбатарейной борьбы, радиолокационный объект, снаряд.

ESTIMATION OF THE RADAR VISIBILITY LEVEL OF ROCKET OF THE MULTIPLE ROCKET LAUNCHER "GRAD" IN DIFFERENT WAVE BANDS

M. Surgay, G. Zalevsky, V. Vasilets, O. Sukharevsky

Values of radar cross section (RCS) of 9M22 122 millimeter rocket of multiple rocket launcher "Grad" were obtained using mathematical simulation methods. Calculated characteristics correspond to VHF, UHF and SHF bands, various aspect angles, horizontal and vertical polarizations. RCS value defines radar visibility level of rocket when counter-battery radars (CBR), which functioned in various wave bands, are applied. The obtained results should be applied for estimation the capabilities of existing CBR, and also at the stage of new advanced radar development.

Keywords: counter-battery radar, mathematical simulation methods, radar object, rocket, secondary radiation.