

М.В. Сургай

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

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СНАРЯДУ ОФ-25 САМОХІДНОЇ ГАУБИЦІ 2С3 "АКАЦІЯ" У РІЗНИХ ДІАПАЗОНАХ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Наводяться значення ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) 152-міліметрового снаряду ОФ-25 у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль, для різних ракурсів об'єкта, на горизонтальній і вертикальній поляризації. Значення ЕПР отримано шляхом математичного моделювання з використанням електродинамічних методів розрахунку, що дозволяють отримувати характеристики розсіювання радіолокаційних об'єктів різних електричних розмірів. Проведено порівняльний аналіз ЕПР снаряду у трьох частотних діапазонах. Отримані результати можуть бути використаними для оцінювання можливостей існуючих радіолокаційних станцій контрбатареїної боротьби, а також на етапі створення перспективного радіолокатора.

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

### Вступ

**Постановка проблеми.** Широке застосування артилерії у сучасних війнах та локальних конфліктах зумовлює необхідність застосування систем контрбатареїної боротьби (КББ). Найбільш інформативними засобами, які застосовуються для розвідки позицій ворожої артилерії, є спеціальні радіолокаційні станції (РЛС) [1–4]. Разом з цим можливості відомих РЛС КББ обмежені. До таких засобів за відомими причинами пред'являються жорсткі вимоги щодо точності вимірювання параметрів траєкторії снарядів та темпу видачі інформації.

На етапі розробки перспективної РЛС КББ важливо мати інформацію про характеристики вторинного випромінювання (ХВВ) снарядів різних типів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У відомій літературі наявні лише часткові дані про ЕПР деяких окремих снарядів. У роботі [3] наведено орієнтовні значення ЕПР чотирьох типів снарядів (мін, ракет) без зазначення частот та інших умов радіолокації. У роботі [4] наведено ХВВ снаряду 9М22 реактивної системи залпового вогню (РСЗВ) "Град" для різних частотних діапазонів, ракурсів опромінення та на двох ортогональних поляризаціях. У монографії [5] наведено надширокопasmові часовий та відповідний частотний (у полосі від 220 до 730 МГц) відгуки артилерійського снаряду (діаметр 155 мм, довжина 667 мм). Відомі дані не дозволяють якісно та кількісно характеризувати особливості вторинного випромінювання даного класу радіолокаційних об'єктів.

Разом з цим на практиці важливо мати дані про ХВВ боєприпасів різних типів у всьому радіолока-

ційному діапазоні. Задача отримання характеристик вторинного випромінювання снарядів (ракет) може бути вирішена за допомогою математичного моделювання. Сучасні обчислювальні методи дозволяють отримувати інформацію про ХВВ радіолокаційних об'єктів з достатньою точністю [4–15].

У зв'язку з наведеним вище **метою статті** є математичне моделювання та аналіз ХВВ снаряду ОФ-25 самохідної гаубиці 2С3 "Акація". У роботі отримано значення ЕПР снаряду, що розглядається, у різних діапазонах довжин хвиль, для довільних ракурсів та на двох ортогональних поляризаціях. Здійснено їх порівняння із відповідними характеристиками снаряду 9М22 РСЗВ "Град" [4]. Отримані дані мають практичну цінність при оцінюванні можливостей існуючих РЛС КББ та на етапі розробки перспективного радіолокатора.

### Виклад основного матеріалу

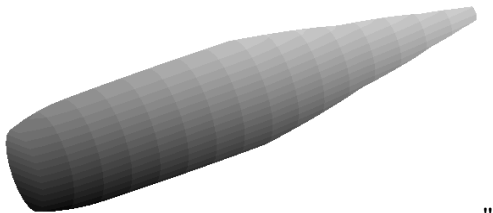
#### 1. Методи розрахунку характеристик вторинного випромінювання, що використовуються

У роботах [4–15] описано електродинамічні методи, які можуть застосовуватись для моделювання ХВВ снаряду у різних діапазонах довжин хвиль. Кожен з цих методів передбачає використання моделі поверхні шуканого об'єкта. Для моделювання створено модель поверхні снаряду ОФ-25, яку подано на рис. 1. Снаряд ОФ-25 (рис. 1) має довжину 0,709 м, діаметр 0,152 м [16]. Тому даний об'єкт є розсіювачем резонансних розмірів у метровому та дециметровому діапазонах довжин хвиль та розсіювачем великих електричних розмірів у сантиметровому діапазоні. Снаряд, що розглядається, має достатньо просту форму, його поверхню можна вважа-

ти ідеально провідною. Тому для розрахунків ХВВ снаряду у метровому та дециметровому діапазонах застосовується метод, заснований на розв'язанні інтегральних рівнянь [4–5; 9; 12–15], а у сантиметровому діапазоні асимптотичний високочастотний метод, описаний у роботах [10–11; 13; 15]. Дані методи дозволяють з достатньою точністю [11; 14] моделювати просторові та часово-частотні характеристики розсіювання об'єктів у вільному просторі при заданих умовах радіолокаційного опромінювання. У роботі розраховано ЕПР снаряду ОФ-25 у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах на двох ортогональних поляризаціях для різних ракурсів снаряду. Проводиться порівняння отриманих ХВВ снаряду ОФ-25 із розрахованими раніше характеристиками снаряду 9М22 РСЗВ "Град".



а



б

Рис. 1. Снаряд ОФ-25:

а – зовнішній вигляд, б – модель поверхні снаряду

**2. Результати розрахунку ЕПР снаряду ОФ-25 самохідної гаубиці 2С3 "Акація"**

За допомогою електродинамічних чисельних методів [4–5; 9–15] проведено розрахунок моностаціонарної ЕПР  $\sigma_c$  снаряду ОФ-25 для заданих вхідних даних:

- напрямком суміщеного опромінення і прийому, що характеризується кутами  $\beta_c, \epsilon_c$  відповідно (значення  $\beta_c, \epsilon_c = 0$  відповідають носовому ракурсу – зондуванню вздовж осі снаряду, спереду, а  $\beta_c = 90$  град. відповідає боковому ракурсу – зондуванню у напрямку, ортогональному осі снаряду);
- частота зондувального сигналу  $f_{зонд}$  (довжина на хвилі);
- поляризація зондувального сигналу (горизонтальній поляризації (ГП) відповідає зондувальний

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

При розрахунках азимутальний кут  $\beta_c$  змінювався із кроком 0,1 град. Кожному фіксованому  $\beta_c$  відповідав випадковий кут місця, розподілений за рівномірним законом у діапазоні  $\epsilon_c \pm 4$  град.. Кут  $\epsilon_c$  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 ( $\sigma_c$ ) снаряду ОФ-25 від азимутального кута  $\beta_c$ , при  $\epsilon_c = 10$  град., на різних частотах і на двох ортогональних поляризаціях. Чорна тонка лінія відповідає ГП, сіра жирна – ВП.

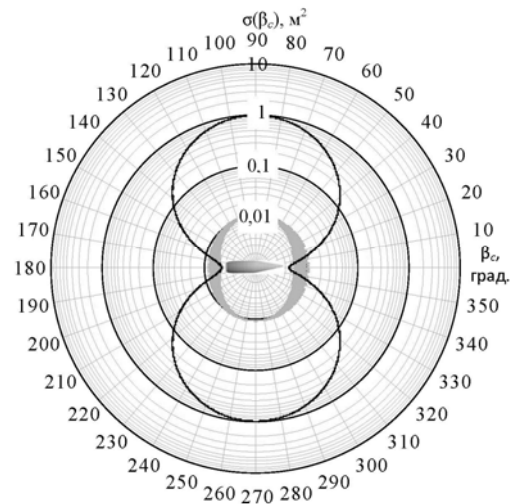


Рис. 2. ДЗВВ снаряду ОФ-25 на частоті 0,167 ГГц

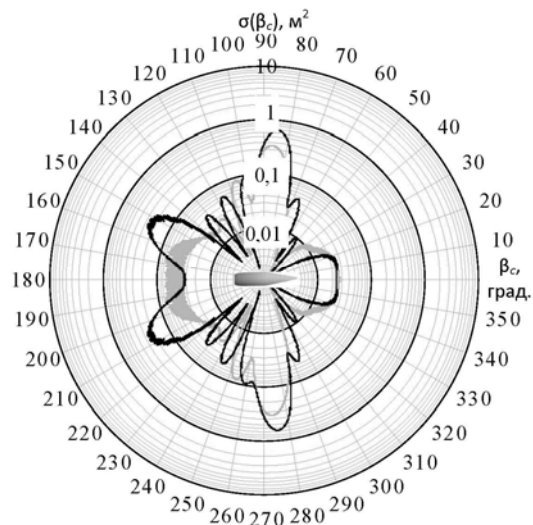


Рис. 3. ДЗВВ снаряду ОФ-25 на частоті 1 ГГц

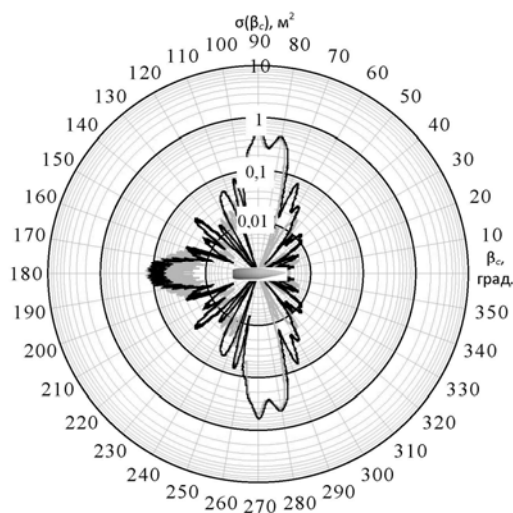


Рис. 4. ДЗВВ снаряду ОФ-25 на частоті 3 ГГц

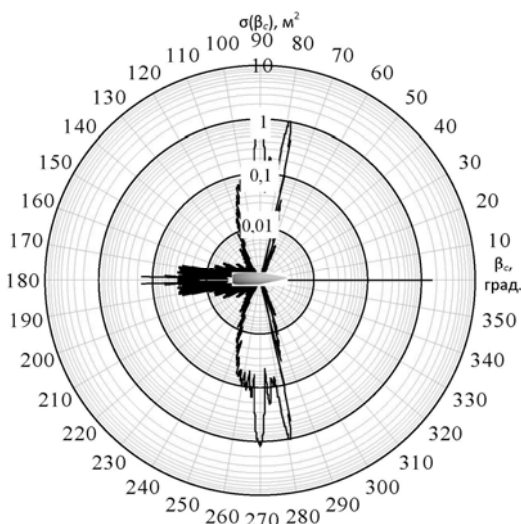


Рис. 5. ДЗВВ снаряду ОФ-25 на частоті 10 ГГц

Проаналізуємо залежність інтенсивності вторинного випромінювання снаряду від різних умов локації.

ДЗВВ снаряду на різних частотах, подані на рис. 2–5, демонструють залежність характеру вторинного випромінювання від електричного розміру розсіювача. У всіх розглянутих випадках максимальні значення ЕПР снаряду відповідають боковому ракурсу:  $\sigma_{\text{ГП}}=0,979 \text{ м}^2$  на ГП і  $\sigma_{\text{ВП}}=0,011 \text{ м}^2$  на ВП при  $f_{\text{зонд}}=0,167 \text{ ГГц}$ ;  $\sigma_{\text{ГП}}=0,65 \text{ м}^2$ ,  $\sigma_{\text{ВП}}=0,338 \text{ м}^2$  при  $f_{\text{зонд}}=1 \text{ ГГц}$ ;  $\sigma_{\text{ГП}}=0,608 \text{ м}^2$ ,  $\sigma_{\text{ВП}}=0,516 \text{ м}^2$  при  $f_{\text{зонд}}=3 \text{ ГГц}$ ;  $\sigma_{\text{ГП}} \approx \sigma_{\text{ВП}}=1,58 \text{ м}^2$  при  $f_{\text{зонд}}=10 \text{ ГГц}$ .

Виходячи з ДЗВВ на рис. 2, при частоті 0,167 ГГц снаряд перевипромінює як диполь. Це пояснюється його електрично малими діаметром та довжиною. На ВП інтенсивність вторинного випромінювання значно менша ніж на ГП.

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 снаряду) ДЗВВ на ГП та ВП якісно співпадають (рис. 4–5).

У табл. 1–4 подано результати розрахунку середніх і медіанних значень ЕПР у основних азимутальних секторах для різних кутів місця.

З наведених даних видно, що середні і медіанні значення ЕПР снаряду ОФ-25 у метровому і дециметровому діапазонах, відповідні ГП, в основному перевищують аналогічні значення для ВП. У більшому ступені зазначене стосується бокового азимутального ракурсу ( $\Delta\beta_c=45\dots135$  град.). Таким чином можна зробити висновок про переваги використання зондувальних сигналів на ГП для локації даного типу снаряду. При частоті 0,167 ГГц спостерігається зростання середніх і медіанних ЕПР снаряду у трьох розглянутих азимутальних секторах при збільшенні кута місця. Аналогічна залежність середньої і медіанної ЕПР від кута місця спостерігається для бокового азимутального ракурсу на всіх решта розглянутих частотах.

Наведені дані показують, що при ГП середні та медіанні значення ЕПР снаряду у основних азимутальних секторах зменшуються із ростом частоти. Найбільший рівень інтенсивності вторинного випромінювання снаряду відповідає метровому діапазону. При ВП такої чіткої залежності від частоти не спостерігається. При даній поляризації у досліджуваних азимутальних секторах максимуми середніх та медіанних ЕПР відповідають різним частотам, хоча можна відзначити певне збільшення рівня вторинного випромінювання на частоті 1 ГГц.

Таким чином, наведені дані показують, що максимальний рівень вторинного випромінювання снаряду ОФ-25 спостерігається при зондуванні сигналом горизонтальної поляризації на частоті 0,167 ГГц.

Як показує порівняння результатів для двох різних снарядів, середні і медіанні ЕПР снаряду ОФ-25 (довжина 0,709 м, діаметр 0,152 м) у розглянутих азимутальних секторах при кутах місця  $0\dots40$  град. можуть приймати значення на порядок менші ніж у випадку снаряду 9М22 (довжина 2,87 м, діаметр 0,122 м) ракетної системи залпового вогню "Град", отримані у роботі [4]. Зокрема на ГП середні значення ЕПР снаряду ОФ-25 при бокових ракурсах у 2,7...7 разів, а для носових у 1,5...19 разів менші ніж для 9М22. Виняток складають лише дані для 3 ГГц, коли ЕПР ОФ-25 може у 3 рази перевищувати ЕПР 9М22.

У цілому зі всіх розглянутих ситуацій снаряди ОФ-25 та 9М22 мають максимальний рівень вторинного випромінювання при ГП зондувального сигналу та на частотах 0,167 і 1 ГГц.

Таблиця 1

Середні значення ЕПР снаряду ОФ-25 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ГП

Азимутальний сектор $\Delta\beta_c$ , град.	Середнє значення ЕПР, м <sup>2</sup>			
	$f_{зонд}$ , ГГц			
	0,167	1	3	10
Кут місяця $\epsilon_c=0$				
0...45	$5,32 \times 10^{-2}$	$1,41 \times 10^{-2}$	$4,78 \times 10^{-3}$	$9,09 \times 10^{-4}$
45...135	0,636	0,108	0,105	$8,57 \times 10^{-2}$
135...180	$4,58 \times 10^{-2}$	0,113	$4,4 \times 10^{-2}$	0,120
Кут місяця $\epsilon_c=10$ град.				
0...45	$5,40 \times 10^{-2}$	$1,31 \times 10^{-2}$	$4,68 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-3}$
45...135	0,638	0,109	0,106	$8,70 \times 10^{-2}$
135...180	$4,70 \times 10^{-2}$	$9,83 \times 10^{-2}$	$2,78 \times 10^{-2}$	$6,51 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=20$ град.				
0...45	$5,58 \times 10^{-2}$	$1,05 \times 10^{-2}$	$4,81 \times 10^{-3}$	$6,10 \times 10^{-4}$
45...135	0,644	0,113	0,111	$9,1 \times 10^{-2}$
135...180	$4,95 \times 10^{-2}$	$6,08 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$2,33 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=30$ град.				
0...45	$5,98 \times 10^{-2}$	$7,16 \times 10^{-3}$	$3,44 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-4}$
45...135	0,651	0,120	0,119	0,102
135...180	$5,35 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-2}$	$8,02 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=40$ град.				
0...45	$6,47 \times 10^{-2}$	$4,78 \times 10^{-3}$	$3,69 \times 10^{-3}$	$8,19 \times 10^{-4}$
45...135	0,661	0,133	0,132	$8,70 \times 10^{-2}$
135...180	$5,9 \times 10^{-2}$	0,018	$6,89 \times 10^{-3}$	$7,71 \times 10^{-3}$

Таблиця 2

Середні значення ЕПР снаряду ОФ-25 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ВП

Азимутальний сектор $\Delta\beta_c$ , град.	Середнє значення ЕПР, м <sup>2</sup>			
	$f_{зонд}$ , ГГц			
	0,167	1	3	10
Кут місяця $\epsilon_c=0$				
0...45	$5,45 \times 10^{-3}$	$1,82 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-3}$	$9,09 \times 10^{-4}$
45...135	$9,38 \times 10^{-3}$	$6,63 \times 10^{-2}$	$8,35 \times 10^{-2}$	$8,57 \times 10^{-2}$
135...180	$5,42 \times 10^{-3}$	$2,66 \times 10^{-2}$	$4,55 \times 10^{-2}$	0,120
Кут місяця $\epsilon_c=10$ град.				
0...45	$8,34 \times 10^{-3}$	$1,77 \times 10^{-2}$	$2,51 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-3}$
45...135	$1,01 \times 10^{-2}$	$6,71 \times 10^{-2}$	$8,45 \times 10^{-2}$	$8,70 \times 10^{-2}$
135...180	$7,07 \times 10^{-3}$	$3,69 \times 10^{-2}$	$2,31 \times 10^{-2}$	$6,51 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=20$ град.				
0...45	$1,99 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$	$2,39 \times 10^{-3}$	$6,10 \times 10^{-4}$
45...135	$1,26 \times 10^{-2}$	$6,97 \times 10^{-2}$	$8,81 \times 10^{-2}$	$9,1 \times 10^{-2}$
135...180	$1,56 \times 10^{-2}$	$8,51 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$	$2,33 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=30$ град.				
0...45	$5,07 \times 10^{-2}$	$3,30 \times 10^{-3}$	$3,03 \times 10^{-3}$	$4,78 \times 10^{-4}$
45...135	$1,77 \times 10^{-2}$	$7,41 \times 10^{-2}$	$9,54 \times 10^{-2}$	0,102
135...180	$4,11 \times 10^{-2}$	$9,12 \times 10^{-2}$	$9,12 \times 10^{-3}$	$1,48 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=40$ град.				
0...45	0,113	$5,24 \times 10^{-4}$	$7,16 \times 10^{-3}$	$8,19 \times 10^{-4}$
45...135	$2,66 \times 10^{-2}$	$8,25 \times 10^{-2}$	0,107	$8,70 \times 10^{-2}$
135...180	0,100	$2,01 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-2}$	$7,71 \times 10^{-3}$

Таблиця 3

Медіанні значення ЕПР снаряду ОФ-25 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ГП

Азимутальний сектор $\Delta\beta_c$ , град.	Медіанне значення ЕПР, м <sup>2</sup>			
	$f_{зонд}$ , ГГц			
	0,167	1	3	10
Кут місяця $\epsilon_c=0$				
0...45	$2,77 \times 10^{-2}$	$1,93 \times 10^{-2}$	$3,47 \times 10^{-3}$	$7,97 \times 10^{-4}$
45...135	0,659	$3,75 \times 10^{-2}$	$3,02 \times 10^{-2}$	$4,70 \times 10^{-3}$
135...180	$2,12 \times 10^{-2}$	$8,02 \times 10^{-2}$	$2,15 \times 10^{-2}$	$3,38 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=10$ град.				
0...45	$2,77 \times 10^{-2}$	$1,61 \times 10^{-2}$	$3,57 \times 10^{-3}$	$7,39 \times 10^{-4}$
45...135	0,663	$3,78 \times 10^{-2}$	$3,13 \times 10^{-2}$	$5,18 \times 10^{-3}$
135...180	$2,24 \times 10^{-2}$	$7,12 \times 10^{-2}$	$1,76 \times 10^{-2}$	$2,55 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=20$ град.				
0...45	$2,98 \times 10^{-2}$	$9,20 \times 10^{-3}$	$4,06 \times 10^{-3}$	$5,41 \times 10^{-4}$
45...135	0,669	$3,75 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-2}$	$6,80 \times 10^{-3}$
135...180	$2,38 \times 10^{-2}$	$4,63 \times 10^{-2}$	$1,18 \times 10^{-2}$	$1,81 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=30$ град.				
0...45	$3,18 \times 10^{-2}$	$5,34 \times 10^{-3}$	$3,11 \times 10^{-3}$	$3,86 \times 10^{-4}$
45...135	0,678	$3,8 \times 10^{-2}$	$3,86 \times 10^{-2}$	$9,47 \times 10^{-3}$
135...180	$2,66 \times 10^{-2}$	$2,59 \times 10^{-2}$	$6,67 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=40$ град.				
0...45	$3,54 \times 10^{-2}$	$3,61 \times 10^{-3}$	$2,39 \times 10^{-3}$	$7,04 \times 10^{-4}$
45...135	0,687	$3,94 \times 10^{-2}$	$4,31 \times 10^{-2}$	$5,29 \times 10^{-3}$
135...180	$3,03 \times 10^{-2}$	$1,87 \times 10^{-2}$	$6,79 \times 10^{-3}$	$2,34 \times 10^{-3}$

Таблиця 4

Медіанні значення ЕПР снаряду ОФ-25 у головних ракурсах опромінення на різних частотах, при ВП

Азимутальний сектор $\Delta\beta_c$ , град.	Медіанне значення ЕПР, м <sup>2</sup>			
	$f_{зонд}$ , ГГц			
	0,167	1	3	10
Кут місяця $\epsilon_c=0$				
0...45	$5,25 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-2}$	$1,65 \times 10^{-3}$	$7,97 \times 10^{-4}$
45...135	$9,60 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$1,48 \times 10^{-2}$	$4,70 \times 10^{-3}$
135...180	$5,21 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^{-2}$	$1,73 \times 10^{-2}$	$3,38 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=10$ град.				
0...45	$8,32 \times 10^{-3}$	$1,93 \times 10^{-2}$	$2,14 \times 10^{-3}$	$7,39 \times 10^{-4}$
45...135	$1,04 \times 10^{-2}$	$2,35 \times 10^{-2}$	$1,54 \times 10^{-2}$	$5,18 \times 10^{-3}$
135...180	$7,12 \times 10^{-3}$	$3,42 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-2}$	$2,55 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=20$ град.				
0...45	$1,91 \times 10^{-2}$	$1,13 \times 10^{-2}$	$2,43 \times 10^{-3}$	$5,41 \times 10^{-4}$
45...135	$1,19 \times 10^{-2}$	$2,35 \times 10^{-2}$	$1,56 \times 10^{-2}$	$6,80 \times 10^{-3}$
135...180	$1,52 \times 10^{-2}$	$8,11 \times 10^{-2}$	$7,92 \times 10^{-3}$	$1,81 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=30$ град.				
0...45	$5,02 \times 10^{-2}$	$2,87 \times 10^{-3}$	$2,26 \times 10^{-3}$	$3,86 \times 10^{-4}$
45...135	$1,56 \times 10^{-2}$	$2,86 \times 10^{-2}$	$1,61 \times 10^{-2}$	$9,47 \times 10^{-3}$
135...180	$4,01 \times 10^{-2}$	$4,19 \times 10^{-2}$	$9,05 \times 10^{-3}$	$1,18 \times 10^{-3}$
Кут місяця $\epsilon_c=40$ град.				
0...45	0,109	$4,57 \times 10^{-4}$	$7,97 \times 10^{-3}$	$7,04 \times 10^{-4}$
45...135	$2,12 \times 10^{-2}$	$3,79 \times 10^{-2}$	$2,14 \times 10^{-2}$	$5,29 \times 10^{-3}$
135...180	$9,8 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-2}$	$8,99 \times 10^{-3}$	$2,34 \times 10^{-3}$

Разом з цим слід відзначити, що при визначенні полоси частот зондувальних сигналів для РЛС КББ необхідно враховувати достатньо високі вимоги до мобільності (габаритів) та точності супроводження снарядів за кутовими координатами, які до таких РЛС пред'являються.

У зв'язку із зазначеним вище можна зробити висновок про доцільність застосування у РЛС КББ сигналів дециметрового діапазону довжин хвиль. При зондуванні у полосі частот 1...3 ГГц (довжини хвиль 30...10 см) забезпечується достатній рівень вторинного випромінювання снарядів (більша дальність їх виявлення та супроводження) і можливість використання достатньо компактних антенних решіток, що забезпечують високу точність вимірювання кутових координат снарядів.

### Висновки

У роботі наведено результати математичного моделювання ДЗВВ снаряду ОФ-25 самохідної гаубиці 2С3 "Акація", його медіанних та середніх значень ЕПР у головних азимутальних ракурсах опромінювання, для різних кутів місця, на частотах 0,167, 1, 3 та 10 ГГц, на двох ортогональних поляризаціях. Результати розрахунку свідчать про те, що

найбільший рівень вторинного випромінювання снаряду ОФ-25 спостерігається на ГП та при частотах зондувального сигналу 0,167 і 1 ГГц, відповідних метровому та дециметровому діапазону. Проведено порівняння ХВВ снарядів ОФ-25 та 9М22, що мають різну форму і геометричні розміри. Показано, що ЕПР двох розглянутих снарядів можуть відрізнитись на порядок. Разом із цим можна відмітити, що основні тенденції зміни ЕПР від поляризації, ракурсу снаряду відносно РЛС та частоти є для цих двох снарядів загальними. Дані показують, що зондування снарядів сигналами горизонтальної поляризації у діапазоні частот 1...3 ГГц має ряд переваг.

Розроблені електродинамічні методи та отримані результати моделювання мають практичну цінність для оцінювання можливостей існуючих РЛС КББ, а також на етапі створення перспективного радіолокатора.

Практичний інтерес також має подальше створення база даних ХВВ снарядів (ракет) різної форми та розмірів при різних умовах радіолокаційного опромінювання.

### Список літератури

1. Крупников А. Радиолокационные станции контрбатареинной борьбы основных зарубежных стран / А. Крупников // Зарубежное военное обозрение. – 2010. – № 12. – С. 32-41.
2. Красюк О.П. Розвідувальне забезпечення артилерії в локальних війнах та збройних конфліктах кінця ХХ – початку ХХІ століття / О. . Красюк // Військово-науковий вісник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. – 2012. – Вип. 18. – С. 339-347.
3. Опанасюк І.І. Радиолокаційні 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.
4. Сургай М.В. Оцінювання рівня радіолокаційної помітності снаряду ракетної системи залпового вогню "Град" у різних діапазонах довжин хвиль / М.В. Сургай, Г.С. Залевський, В.О. Василець, О.І. Сухаревський // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 2 (51). – С. 142-148.
5. Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications / Edited by J. D. Taylor. – Boca Raton London New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. – 476 p.
6. Knott E.F. Radar Cross Section / E.F. Knott, J.F. Shaeffer, M.T. Tuley – 2nd ed. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.
7. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов / Л.А. Львова. – Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. – 232 с.
8. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. – 2-е изд. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
9. Gibson W.C. The Method of Moments in Electromagnetics / W.C. Gibson. – Boca Raton, London, New York: Chapman & Hall / Taylor & Francis Group, 2008. – 288 p.
10. 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.
11. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects / S.V. Nechitaylo, V.M. Orlenko, O.I. Sukharevsky, V.A. Vasilets ; O.I. Sukharevsky ed. – Boca Raton, USA: SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. – 334 p.
12. Zalevsky G.S. Calculation of Scattering Characteristics of Aerial Radar Objects of Resonant Sizes Based on Iterative Algorithm / G.S. Zalevsky, O.I. Sukharevsky // Radioelectronics and Communications Systems. – 2014. – Vol. 57, No. 6. – P. 244-253.
13. 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.
14. Zalevsky G.S. 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.

15. Sukharevsky O.I. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects / O.I. Sukharevsky, V.A. Vasilets, G.S. Zalevsky // [Electron resource] : 2015 IEEE International Radar Conference, 10-15 May, 2015: Proc. – Arlington VA, USA, 2015. – P. 162-167. – 1 CD-ROM.

16. Бєприпасник. Бєприпасы к вооружению сухопутных войск [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://soviet-ammo.ucoz.ru/>.

## References

1. Krupnikov, A. (2010), "Radiolokacionniye stancii kontrbatareynoy bor'by osnovnyh zarubezhnyh stran" [The counter-battery radars of the main foreign countries], *Foreign military review*, No. 12, pp. 32-41.
2. Krasiuk, O.P. (2012), "Rozviduval'ne zabezpechennya artylerii v lokal'nyh viynah ta zbroynyh konfliktah kincia XX – pochatku XXI stolittya" [Reconnaissance support of artillery in local wars and armed conflicts at the end of the XX<sup>th</sup> and at the beginning of the XXI<sup>st</sup> century], *Military and Scientific Herald of the Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy*, No. 18, pp. 339-347.
3. Opanasiuk, I.I. (2015), "Radiolokaciyni stancii kontrbatareynoi borot'by ta perspektyvy yi'h rozvytku" [The counter-battery radars and prospects for their development], *Military and Technical Collected Papers of the Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy*, No. 1, pp. 117-119.
4. Surgaj, M.V., Zalevsky, G.S., Vasylets, V.O. and Suharevsky, O.I. (2017), "Ociniuvannia rivnya radiolokaciynoi pomitnosti snariadu raketnoi systemy zalpovogo vogniu "Grad" u riznyh diapazonah dovhyn hvyl'" [Estimation of the radar visibility level of rocket of the multiple rocket launcher "Grad" in different wave bands], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 2 (51), pp. 142-148.
5. Taylor, J.D. (2016), *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 476 p.
6. Knott, E.F., Shaeffer, J.F. and Tuley, M.T. (1993), *Radar Cross Section*, Artech House, Boston, London, 611 p.
7. L'vova, L.A. (2003), "Radiolokacionnaya zametnost' letatel'nyh apparatov" [Radar Visibility of Aircrafts], RFYATS – VNIITF, Snezhinsk, 232 p.
8. Shirman, Ja.D. (2007), "Radioelektronniye sistemy : Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik" [Radio-electronic systems: Fundamentals of Construction and Theory. Hand-Book], Radiotekhnika, Moscow, 512 p.
9. Gibson, W.C. (2008), *The Method of Moments in Electromagnetics*, Chapman & Hall / Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 288 p.
10. Suharevsky, O.I. and Vasilets, V.A. (2013), Mathematical modeling of radar range profiles of aerial objects, *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 56, No. 11, pp. 3-15.
11. Nechitaylo, S.V., Orlenko, V.M., Vasilets, V.A., and Sukharevsky, O.I. (2014), *Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects*, SRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 334 p.
12. Zalevsky, G.S. and Sukharevsky, O.I. (2014), Calculation of Scattering Characteristics of Aerial Radar Objects of Resonant Sizes Based on Iterative Algorithm, *Radioelectronics and Communications Systems*, Vol. 57, No. 6, pp. 244-253.
13. Zalevsky, G.S., Vasilets, V.A. and Suharevsky, O.I. (2014), "Radiolokacionnye dal'nostnye portrety krylatyh raket v razlichnyh diapazonah dlin voln" [Radar range profiles of cruise missiles in different wave bands], *Applied electronics*, Vol. 13, No. 1, pp. 20-28.
14. Zalevsky, G.S., Sukharevsky, O.I., Vasilets, V.A. and Nechitaylo, S.V. (2014), Secondary Radiation of Resonance Perfectly Conducting Objects, *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 59, No. 12, pp. 1321-1332.
15. Sukharevsky, O.I., Vasilets, V.A. and Zalevsky, G.S. (2015), Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, *IEEE International Radar Conference, 10-15 May, 2015, Proc., Arlington VA, USA*, pp. 162-167. – 1 CD-ROM.
16. "Boepripasnik. Boepripasy k vooruzheniyu suhoputnyh vojsk" [Ammunition for the arming of the ground forces] <http://soviet-ammo.ucoz.ru/>.

Надійшла до редколегії 18.06.2018

Схвалена до друку 17.07.2018

### Відомості про автора:

**Сургай Максим Володимирович**  
старший викладач  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,  
Харків, Україна  
<https://orcid.org/0000-0002-3979-005X>

### Information about the author:

**Maksim Surgai**  
Senior Instructor of  
Ivan Kozhedub Kharkiv  
National Air Force University,  
Kharkiv, Ukraine  
<https://orcid.org/0000-0002-3979-005X>

---

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СНАРЯДА ОФ-25 САМОХОДНОЙ ГАУБИЦЫ 2С3 "АКАЦИЯ"  
В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН**

М.В. Сургай

*Приводятся значения эффективной поверхности рассеивания (ЭПР) 152-миллиметрового снаряда ОФ-25 в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн, для различных ракурсов объекта, на горизонтальной и вертикальной поляризации. Значения ЭПР получено путем математического моделирования с применением электродинамических методов расчета, позволяющих получить характеристики рассеивания радиолокационных объектов различных электрических размеров. Проведен сравнительный анализ ЭПР снаряда в трех частотных диапазонах. Полученные результаты могут быть использованы для оценивания возможностей существующих радиолокационных станций контрбатарейной борьбы, а также на этапе создания перспективного радиолокатора.*

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

**MATHEMATICAL SIMULATION OF SECONDARY RADIATION CHARACTERISTICS  
OF THE SHELL OF-25 FOR SELF-PROPELLED GUN 2C3 "AKATSIYA"  
IN VARIOUS WAVE BANDS**

M. Surgay

*Values of radar cross section (RCS) of 152 millimeter OF-25 shell are presented in VHF, UHF and SHF bands, for various aspect angles, and for horizontal and vertical polarization. RCS values were obtained by means of mathematical simulation, using electrodynamic numerical methods, which allow obtaining scattering characteristics of radar objects having different electric sizes. During simulations OF-25 shell was considered as perfectly conducting air object. Numerical model of its surface was created. For simulation in VHF and UHF band, when shell has resonant sizes, a numerical method based on integral equation solving was used. During calculations in SHF band, when the shell is the air object of large electric sizes, an asymptotic high-frequency method was applied. Comparative analysis of shell's RCS in various conditions was carried out. Results show that maximum level of OF-25 shell secondary radiation is observed in case of sounding on horizontal polarization and frequencies of probing signal 0.167 and 1 GHz which corresponded to VHF and UHF bands. Also scattering characteristics of the RP-25 and 9M22 shells having different shapes and geometric sizes are compared. It is shown that the mean RCS of the two considered shells may differ in order. At the same time, it can be noted that the main trends in the RCS change, depending on the polarization and frequency of probing signal, and also on shell's aspect angle relative to the radar, are common for two considered shells. The obtained data show that radar sounding of shells by signals having horizontal polarization in the frequency range 1...3 GHz has some advantages. Developed electrodynamic methods and obtained results can be used for estimating facilities of existing counter-battery radars, and also at the stage of perspective radar developing. The further development of a database of scattering characteristics of shells (rockets) of various shapes and geometrical sizes under various radar sounding conditions is also of practical interest.*

**Keywords:** artillery shell, counter-battery radar, mathematical simulation methods, radar object, scattering characteristics.