

УДК 621.396.96

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.152740

Характеристики радіолокаційного розсіяння моделі штурмовика СУ-25Т у різних діапазонах довжин хвиль

С. В. Герасимов, Я. О. Белевщук, І. Є. Ряполов, М. А. Павленко,
О. І. Тимочко, О. М. Дмітрієв, М. Г. Живицький, Н. М. Гончаренко

Показано, що проведення математичного моделювання дозволяє створювати та досліджувати радіолокаційні портрети сучасних і перспективних літальних апаратів. Побудова та дослідження математичних моделей на базі сучасної інформаційно-обчислювальної техніки може реалізовувати методи розрахунку характеристик вторинного випромінювання літальних апаратів з потрібною точністю, що забезпечить практичну спрямованість. Обґрунтований метод розрахунку характеристик вторинного випромінювання літальних апаратів для аналізу радіолокаційного розсіяння моделі протитанкового штурмовика Су-25Т. Перевагою такого методу є врахування інтегральних уявлень класичної електродинаміки та короткохвильових асимптотик. Запропонована модель поверхні літака Су-25Т та розроблено метод математичного моделювання. Обґрунтовані основні характеристики радіолокаційного розсіяння літальних апаратів – ефективна поверхня розсіяння, "некогерентна" ефективна поверхня розсіяння, середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіяння, закони розподілу амплітудного множника відбитого сигналу. Наведені результати розрахунку таких характеристик радіолокаційного розсіяння літака Су-25Т для різних частот опромінення сигналу зондування. Отримані результати пропонується використати при модернізації існуючих і проектуванні перспективних засобів радіолокації. Представлені результати є корисними для оцінювання можливостей різних конструктивних варіантів таких засобів щодо виявлення, супроводження та розпізнавання літальних апаратів аналогічного типу. Застосування отриманих результатів дозволить проводити оптимізацію конструкції модернізованих і перспективних літальних апаратів з метою зменшення радіолокаційної помітності. Запропонований метод є основою математичного моделювання радіолокаційних характеристик літальних апаратів різних типів при заданих просторових і часово-частотних параметрах сигналів зондування для розв'язання прикладних задач радіолокації

Ключові слова: аеродинамічна модель літального апарату, вторинне випромінювання, ефективна поверхня розсіяння

1. Вступ

Наявність даних про характеристики вторинного випромінювання літального апарату дозволяє вирішувати декілька практичних задач радіолокації. З одного боку, проводити комплекс заходів щодо формування позиційного району підрозділів, що забезпечують розвідувальною та бойовою

інформацією частини і підрозділи зенітних ракетних військ. А з другого боку, можна отримувати інформацію, яка дозволяє виявити ділянки поверхні об'єкту, що вносять домінуючий внесок в зворотне розсіювання об'єкта в цілому. Це надасть можливість оцінювати ефективність передбачуваних заходів з оптимізації радіолокаційних характеристик як всього об'єкта, так і окремих його ділянок.

Існує два найбільш відомих способів отримання радіолокаційної інформації про повітряні об'єкти: натурні (фізичні) експерименти та математичне моделювання вторинного випромінювання повітряних об'єктів.

Кожен із запропонованих способів пов'язаний з певними труднощами. Так, при проведенні натурних (фізичних) експериментів необхідні колосальні матеріальні, організаційні та часові витрати. Основні труднощі при математичному моделюванні вторинного випромінювання моделей повітряних об'єктів пов'язані з точністю розробки самої моделі, правильністю її математичного опису та інше.

Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки дозволяє реалізовувати достатньо складні методи математичного моделювання вторинного випромінювання повітряних об'єктів з необхідною точністю для використання на практиці.

Таким чином, розрахунок характеристик розсіювання сучасних повітряних об'єктів є актуальним науковим завданням.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Побудова радіолокаційних портретів повітряних об'єктів проводиться з метою покращення показників їх виявлення та розпізнавання, імітації літальних апаратів потрібного типу. Для імітації повітряних об'єктів часто виконують хибні цілі у вигляді буксируваних літальних апаратів найпростішої конструкції. Геометричні розміри таких літальних апаратів значно менше об'єктів, що захищаються, проте сигнали від хибних цілей на вході приймача перевищують сигнали, відбиті від об'єкта захисту [1]. У роботі [2] представлені результати чисельного моделювання радіолокаційних дальностних портретів крилатих ракет в метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах довжин хвиль. Для моделювання використані чисельні методи для розрахунку характеристик вторинного випромінювання повітряних об'єктів складної форми різних електричних розмірів. Але у цій роботі основна увага приділяється аналізу радіолокаційних дальностних портретів крилатих ракет при різних ракурсах, поляризації і ширині спектра зондуючого сигналу, обговорюється можливість їх застосування як хибних цілей.

У роботах [3–5] детально обґрунтовані переваги і недоліки застосування інтегральних рівнянь для розрахунку характеристик вторинного випромінювання повітряних об'єктів. Однак представлені результати доцільно застосовувати для об'ємних об'єктів з малою кривизною, таких як крилаті ракети або безпілотні літальні апарати [2, 6].

Метод розрахунку ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) тригранного кутового відбивача довільних форми і умов опромінення наведено у роботі [7]. З

практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з визначенням оптимальної геометричної форми відбивачів і додаткового обладнання активними системами випромінювання або перевідбиття радіолокаційних сигналів.

Необхідність проведення дослідження, результати якого представлені у даній роботі, підтверджуються авторами робіт [8–10]. Вирішення спектру завдань повітряним об'єктом досягається знаходженням раціонального поєднання льотно-технічних, таких що демаскують, експлуатаційних і інших характеристик, в їх сукупності на основі комплексного підходу до формування його зовнішності, у тому числі при опромінюванні різними радіолокаційними сигналами [10].

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого отриманню характеристик розсіювання повітряних об'єктів на основі раніше створених високочастотних методів розрахунку з комплексним врахуванням всієї сукупності домінуючих чинників.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є визначення радіолокаційних характеристик штурмовика Су-25Т при різних частотах опромінювання. Це дасть можливість проводити оптимізацію конструкції модернізованих і перспективних літальних апаратів з метою зменшення радіолокаційної помітності.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- розробити модель поверхні протитанкового штурмовика Су-25Т;
- запропонувати основні розрахункові співвідношення, які складають основу методу отримання радіолокаційних характеристик літального апарату;
- визначити особливості впливу опромінювання (сантиметрового, дециметрового, метрового діапазонів довжин хвиль) на аналіз радіолокаційних характеристик (радіолокаційного портрету) штурмовика Су-25Т.

4. Метод розрахунку радіолокаційних характеристик протитанкового штурмовика Су-25Т

Су-25Т – протитанковий штурмовик (ПШ), представлений на рис. 1, призначений для знищення бронетехніки, вогневих засобів, кораблів (до есмінця включно), вертольотів, транспортних літаків, мостів, укриттів, комплексів ППО і живої сили супротивника. Застосування можливе вдень і вночі, на полі бою і на глибині до 450 км за лінією фронту, в діапазоні висот від 30 до 5000 м [11].

Штурмовик Су-25Т є модифікацією штурмовика Су-25, розробленого з метою безпосередньої підтримки сухопутних військ. Відразу після офіційного закінчення випробувань була створена особлива авіаційна ескадрилья, що була озброєна Су-25, яка була відправлена до Афганістану. Саме там цей літак отримав свою назву "Грач". Штурмовик Су-25 воював в Афганістані на протязі восьми років і цей період показав свою високу надійність та ефективність.



Рис. 1. Протитанковий штурмовик Су-25Т

"Грачі" здійснили 60 тисяч вильотів, загубивши при цьому лише 23 машини. Бували випадки, коли Су-25 поверталися на аеродром, маючи до 150 пробоїн. Жоден з літаків не був загублений з-за вибуху паливних баків або загибелі пілота. Крім Афганістану штурмовик Су-25 приймав участь у громадянському конфлікті в Анголі. Ці літаки приймали участь в ірано-іракській війні, але інформації про їх бойове застосування немає. Ці літаки були задіяні в конфліктах, які проходили у колишніх радянських республіках. Ці машини воювали в Африці, активно застосовувались в ході першої та другої чеченської війни. Су-25 застосовуються в Іраку проти бойовиків організації ІГІЛ [12].

4. 1. Опис об'єкту моделювання та його модель поверхні

За своєю конструкцією літак Су-25Т – одномісний цільнометалевий моноплан, виконаний за нормальною схемою з високорозташованим крилом малої стрілоподібності, переставним на взльоті і посадці стабілізатором, нерегульованим повітрозабірником і трьохопорним шасі з носовим колесом, з двома безфорсажними турбореактивними двигунами. Су-25Т розроблений на основі аеродинамічної компоновки двохмісного учбово-бойового літака Су-25УБ, тому конструктивна ідентичність за планером і літаковим системам з літаком Су-25УБ складає (85...90) %.

Окремі характеристики Су-25Т наступні [11]:

- геометричні та вагові характеристики: розмах крила – 14,52 м; довжина – 15,33 м; висота – 5,20 м; маса – (9500...19500) кг;
- тип двигунів – турбореактивні з безфорсажними камерами Р-195М;
- бойові можливості: максимальна швидкість – 950 км/год; бойове навантаження – 4400 кг; бойовий радіус дії – (400...700) км; максимальна висота бойового застосування – 5000 м; практична стеля – 10000 м.

У відповідності з конструкцією Су-25Т для проведення розрахунків радіолокаційних характеристик (РЛХ) (зокрема, ЕПР) була побудована модель його поверхні.

Модель поверхні ПШ Су-25Т представлена на рис. 2.

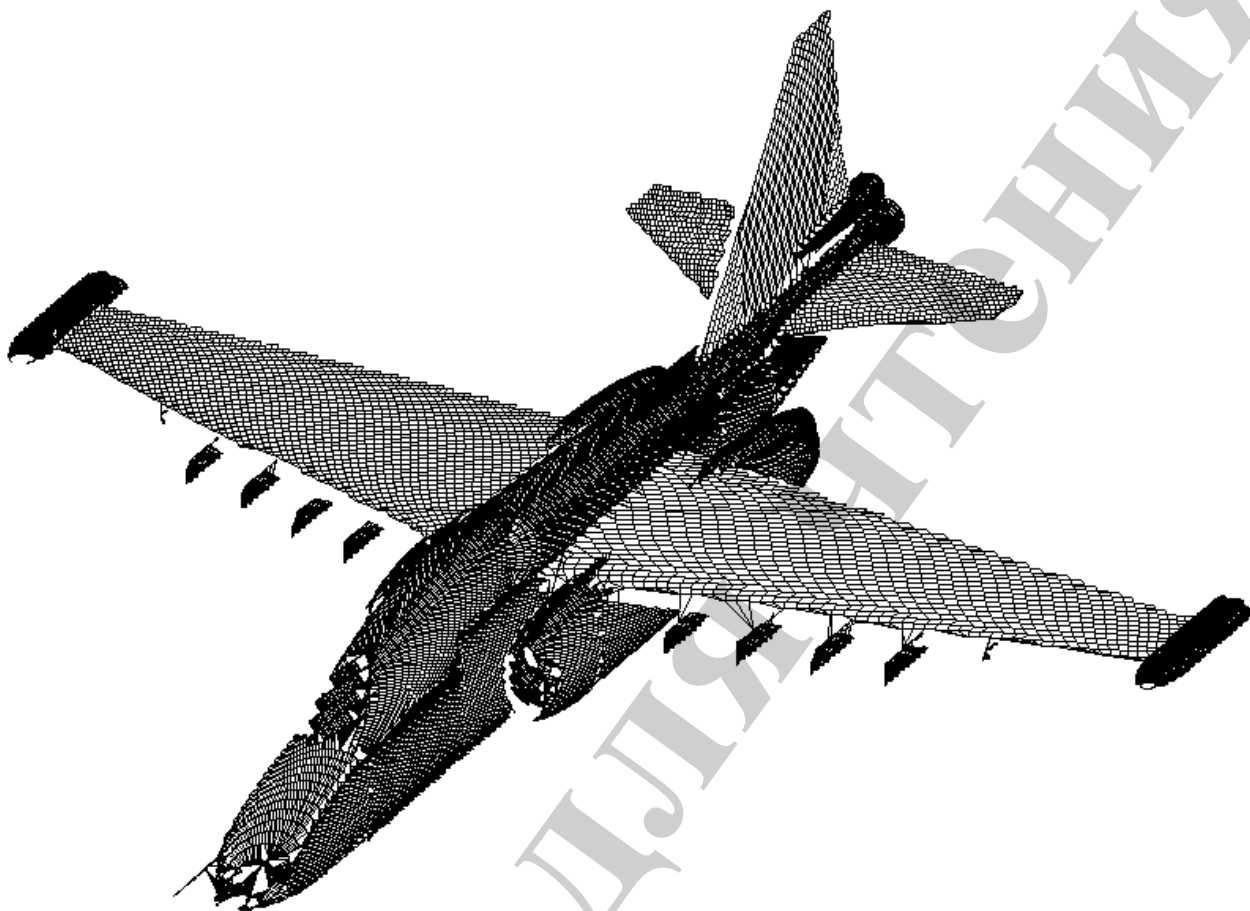


Рис. 2. Модель поверхні протитанкового штурмовика Су-25Т

Моделювання поверхні проводилось у відповідності з методикою, яка приведена в [1–3]. Ця методика передбачає розбиття поверхонь, що розсіюють та елементів об'єкту на дві групи: гладка частина поверхні та крайкові локальні ділянки розсіювання, а також на антенну систему, що розташована під носовим діелектричним обтічником. Гладка частина поверхні літака була апроксимована за допомогою ділянок 63 трьохвісних еліпсоїдів. Зломи поверхні були промодельовані за допомогою 31 прямої локальної кромкової ділянки розсіювання.

4. 2. Основні розрахункові співвідношення

Основною характеристикою, яка визначає властивості об'єкту, що відбиває електромагнітні хвилі, є ЕПР [7, 8]:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_s|^2}{|\vec{p}^0 \cdot \vec{E}^0|^2}, \quad (1)$$

де R – відстань від об'єкта до точки спостереження; \vec{p}^{np} , \vec{p}^0 – орти поляризації приймальної і передавальної антен відповідно; \vec{E}_s – комплексна амплітуда поля, що розсіяно в напрямку точки прийому сигналу; \vec{E}^0 – комплексна амплітуда поля плоскої монохроматичної ЕМХ, що зондує об'єкт.

Передбачається, що зондування проводиться плоскою монохроматичною ЕМХ одиничної амплітуди з ортом поляризації \vec{p}^0 і напрямком поширення, що характеризується ортом \vec{R}^0 , яка падає на поверхню об'єкта, розташованого в вільному просторі (рис. 2):

$$\vec{E}^0(\vec{x}) = \vec{p}^0 \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})), \quad (2)$$

$$\vec{H}^0(\vec{x}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) \exp(jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})), \quad (3)$$

де k_0 – хвильове число у вільному просторі ($k_0 = 2\pi/\lambda$, λ – довжина падаючої монохроматичної хвилі), ϵ_0 , μ_0 – абсолютні діелектрична і магнітна проникності вакууму, \vec{x} – радіус-вектор точки на поверхні об'єкту. Поле, розсіяне об'єктом в напрямку \vec{r}^0 , за допомогою леми Лоренца може бути представлено у вигляді [1, 7]:

$$\vec{p}^{np} \cdot \vec{E}_s = -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \times \int_S \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\vec{p} \cdot \vec{H}^\perp) + (\vec{p} \times \vec{r}^0) \cdot \vec{E}^\perp \right) \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS, \quad (4)$$

де $\vec{E}^\perp = \vec{n} \times \vec{E}$, $\vec{H}^\perp = \vec{n} \times \vec{H}$, (\vec{E}, \vec{H}) – повне поле; \vec{n} – орт зовнішньої нормалі до поверхні інтегрування S , що охоплює даний об'єкт.

Поверхня S вибрана так, щоб збігалася з поверхнею об'єкта всюди за винятком околиць зламів, де проходить по тороїдальній поверхні кругового перетину, "натягнутого" на злам.

Поверхню можна представляється у вигляді суми $S = S_1 + S_0$, де S_1 збігається з гладкими ділянками поверхні, а S_0 – сукупність тороїдальних околиць кромки. Таким чином, інтеграл в (4) являє собою суму інтегралів по поверхнях S_1 і S_0 .

Поле, розсіяне гладкою частиною поверхні об'єкта S_1 в напрямку \vec{r}^0 , може бути представлено у вигляді частини виразу (4):

$$\vec{p}^{\text{np}} \cdot \vec{E}_{S_1} = -jk_0 \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} \times$$

$$\times \int_{S_1} \left(\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\vec{p} \cdot \vec{H}^\perp) + (\vec{p} \times \vec{r}^0) \cdot \vec{E}^\perp \right) \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS. \quad (5)$$

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

$$\vec{p}^{\text{np}} \cdot \vec{E}_{S_0} = -jk_0 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{\exp(jk_0 R)}{4\pi R} (\vec{p} \cdot \vec{F}(\vec{r}^0)), \quad (6)$$

де

$$\vec{F}(\vec{r}^0) = \int_{S_0} \left[\vec{H}^\perp - \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{E}^\perp \times \vec{r}^0) \right] \exp(-jk_0(\vec{r}^0 \cdot \vec{x})) dS.$$

Запропоновані основні розрахункові співвідношення (1)–(6) складають основу методу отримання радіолокаційних характеристик літального апарату.

4. 3. Радіолокаційні характеристики моделі штурмовика Су-25Т при різних частотах опромінення (довжинах хвиль)

Розрахунок характеристик розсіювання ПШ Су-25Т проводився при наступних параметрах:

– кут місця зондування –3 градуси відносно площини горизонту (зондування з нижньої напівсфери);

– крок зміни азимуту зондування 0,02 градуса, азимут відраховується в градусах від носового ракурсу (0 градусів – зондування в ніс, 180 градусів – зондування у хвіст);

– поляризація – горизонтальна.

Наводяться наступні РЛХ:

– кругові діаграми ЕПР і "некогерентної" ЕПР;

– середні і медіанні значення миттєвої ЕПР для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс (0–45 градусів);

– бік (45–135 градусів), хвіст (135–180 градусів);

– середні та медіанні значення миттєвої ЕПР для двадцятиградусних діапазонів азимутів опромінення.

Під медіанним значенням ЕПР в конкретному секторі кутів опромінення розуміється деяке не випадкове значення ЕПР, ймовірність перевищення та не перевищення якого в заданому секторі кутів становить 0,5.

Під "некогерентною" ЕПР (НЕПР) розуміється сума ЕПР окремих ділянок поверхні, яка не враховує взаємних фазових набігів.

Наведені гістограми амплітудного множника відбитого сигналу для

різних частот опромінення зондуючого сигналу.

Всі перераховані характеристики наведені для випадку сумісного прийому.

4. 3. 1. Радіолокаційні характеристики моделі Су-25Т при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см)

На рис. 3 приведена кругова діаграма ЕПР моделі ПШ Су-25Т.

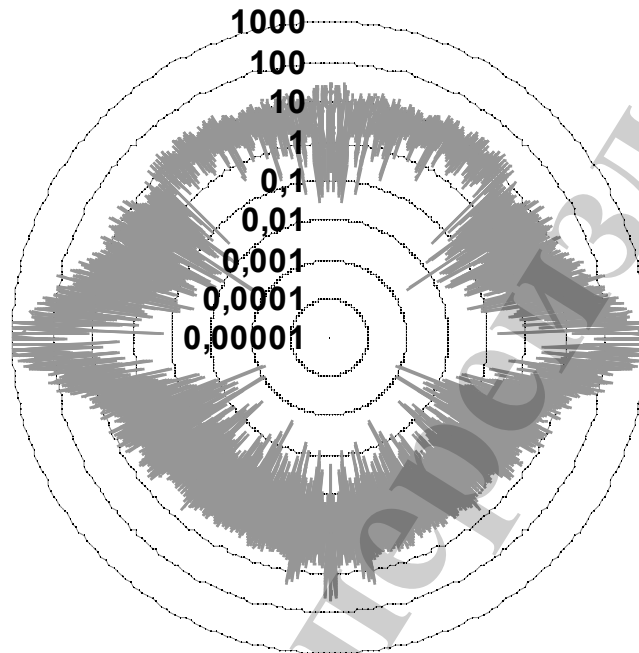


Рис. 3. Кругова діаграма ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

На рис. 4 приведена кругова діаграма НЕПР моделі ПШ Су-25Т.

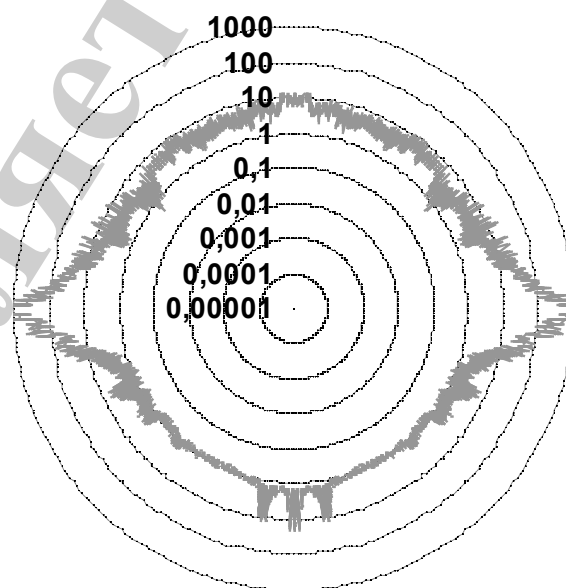


Рис. 4. Кругова діаграма "некогерентної" ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

Середня ЕПР моделі ПШ Су-25Т складає $73,31 \text{ м}^2$. Кругова медіанна ЕПР (значення ЕПР, яке використовується при розрахунках дальності виявлення літака з ймовірністю 0,5) складає $2,86 \text{ м}^2$.

На рис. 5 наведені середні та медіанні значення ЕПР для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст).

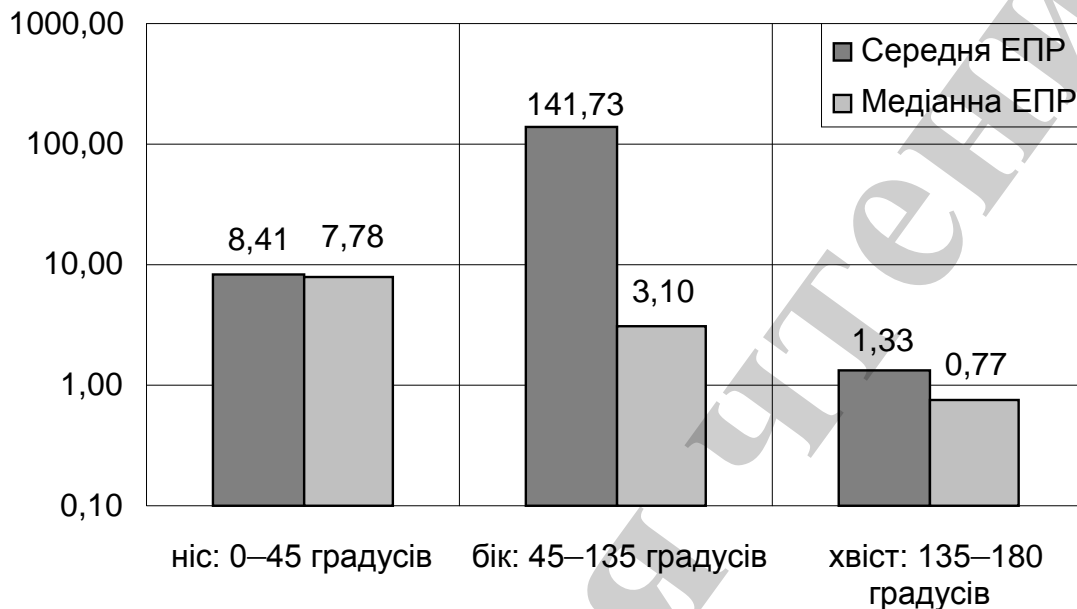


Рис. 5. Середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіювання для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст)

На рис. 6 наведені середні та медіанні значення ЕПР для діапазонів у 20 градусів.

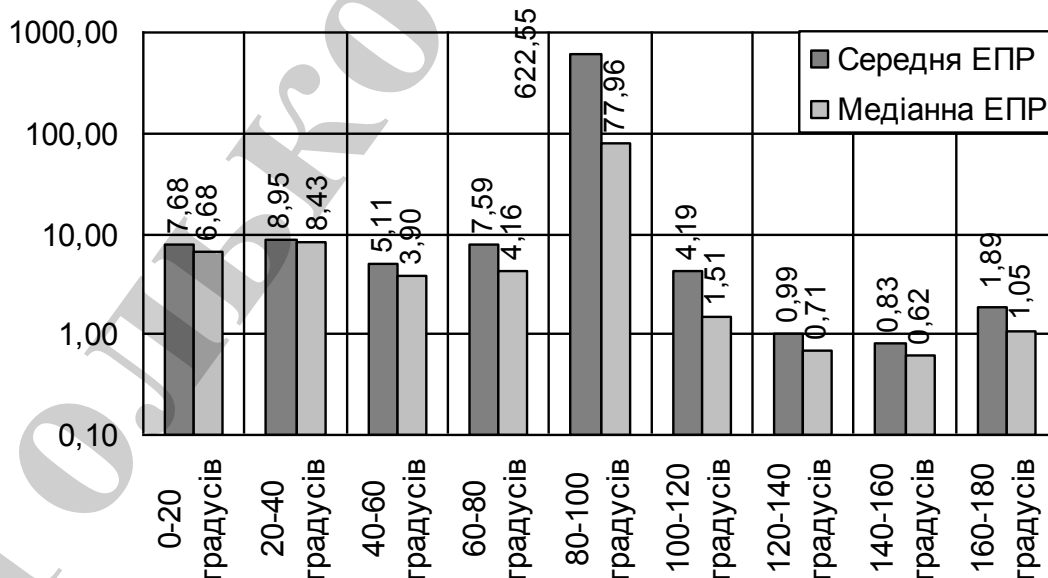


Рис. 6. Середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіювання для двадцятиградусних діапазонів азимутів опромінення

На рис. 7 наведена гістограма амплітудного множника (квадратного кореня з ЕПР) відбитого сигналу для діапазону азимутів опромінення $-20\dots+20$ градусів (бойові носові ракурси). Жирною лінією наведена функція щільності ймовірності розподілу, якою можна апроксимувати гістограму амплітудного множника. В даному випадку гістограма амплітудного множника може бути апроксимована за допомогою нормального закону розподілу ймовірності з функцією щільності:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

де $\mu=2,566$; $\sigma=0,980$.



Рис. 7. Гістограма амплітудного множника (квадратного кореня зі значень ефективної поверхні розсіювання) відбитого сигналу

Отже, радіолокаційні характеристики моделі Су-25Т при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) показані на рис. 3–6. Отримані рисунки складають радіолокаційний портрет протитанкового штурмовика Су-25Т на частоті 10 ГГц.

4. 3. 2. Радіолокаційні характеристики моделі штурмовика Су-25Т при частоті опромінення 1 ГГц (довжина хвилі 30 см)

На рис. 8 приведена кругова діаграма ЕПР моделі ПШ Су-25Т.

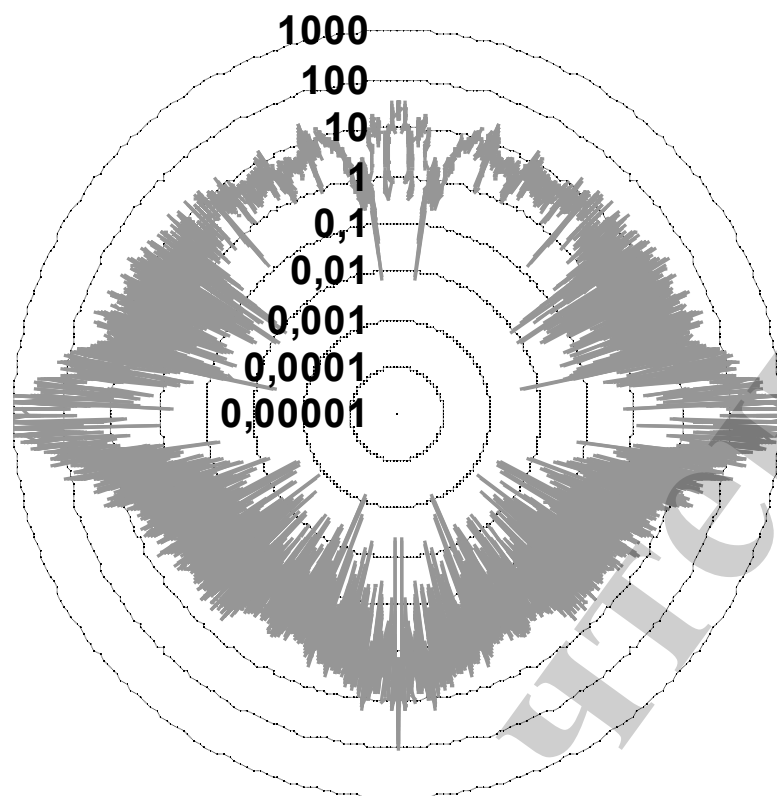


Рис. 8. Кругова діаграма ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

На рис. 9 приведена кругова діаграма НЕПР моделі ПШ Су-25Т.

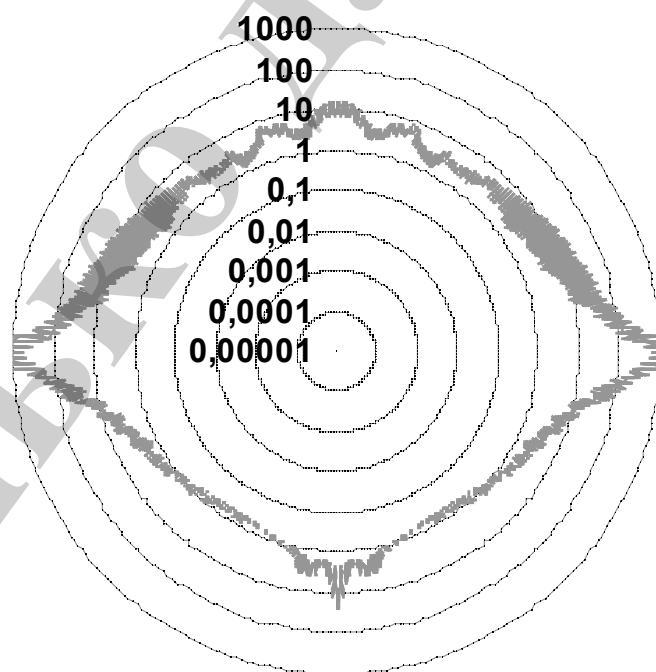


Рис. 9. Кругова діаграма "некогерентної" ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

Середня ЕПР моделі ПШ Су-25Т складає 55,13 м²; кругова медіанна ЕПР складає 2,66 м².

На рис. 10 наведені середні та медіанні значення ЕПР для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст).

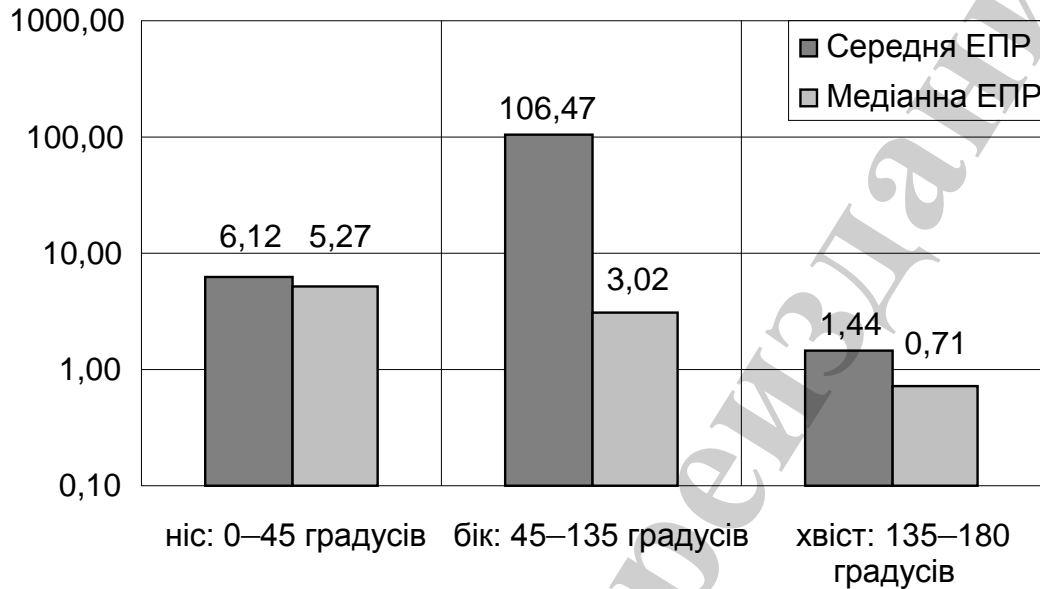


Рис. 10. Середні та медіанні значення "некогерентної" ефективної поверхні розсіювання для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст)

На рис. 11 наведені середні та медіанні значення ЕПР для діапазонів у 20 градусів.

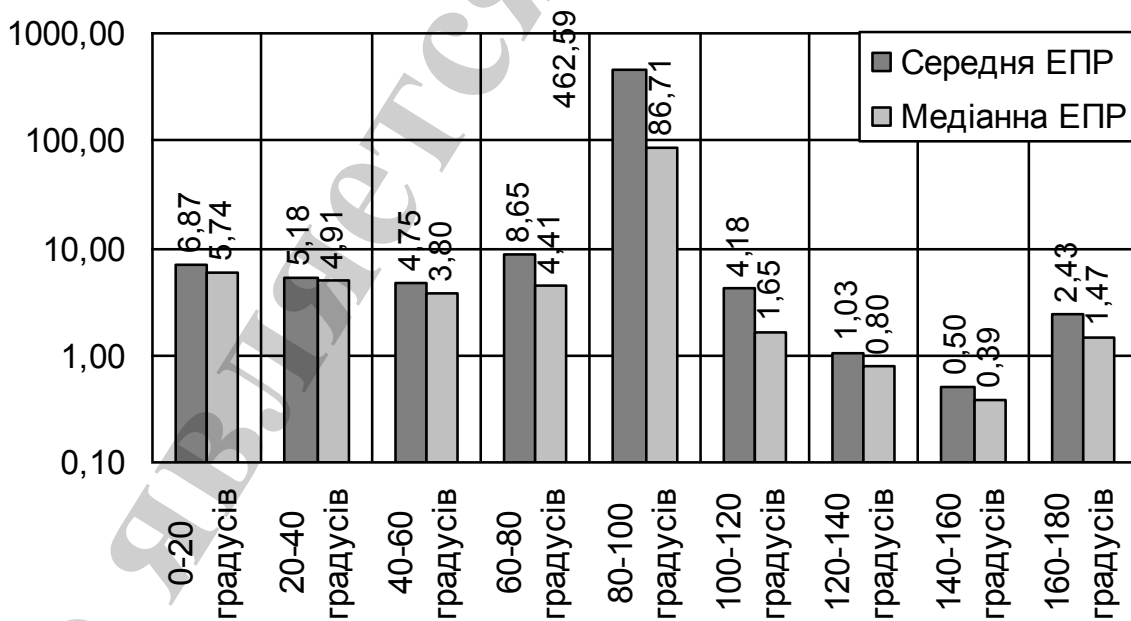


Рис. 11. Середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіювання ЕПР для двадцятиградусних діапазонів азимутів опромінення

На рис. 12 наведена гістограма амплітудного множника (квадратного кореня з ЕПР) відбитого сигналу для діапазону азимутів опромінення $-20\dots+20$ градусів (бойові носові ракурси). Жирною лінією наведена функція щільності ймовірності розподілу, якою можна апроксимувати гістограму амплітудного множника. В даному випадку гістограма амплітудного множника може бути апроксимована за допомогою розподілу Вейбула з функцією щільності:

$$p(x) = \frac{c}{b} \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c}, \quad (8)$$

де $b=2,626$; $c=2,068$.

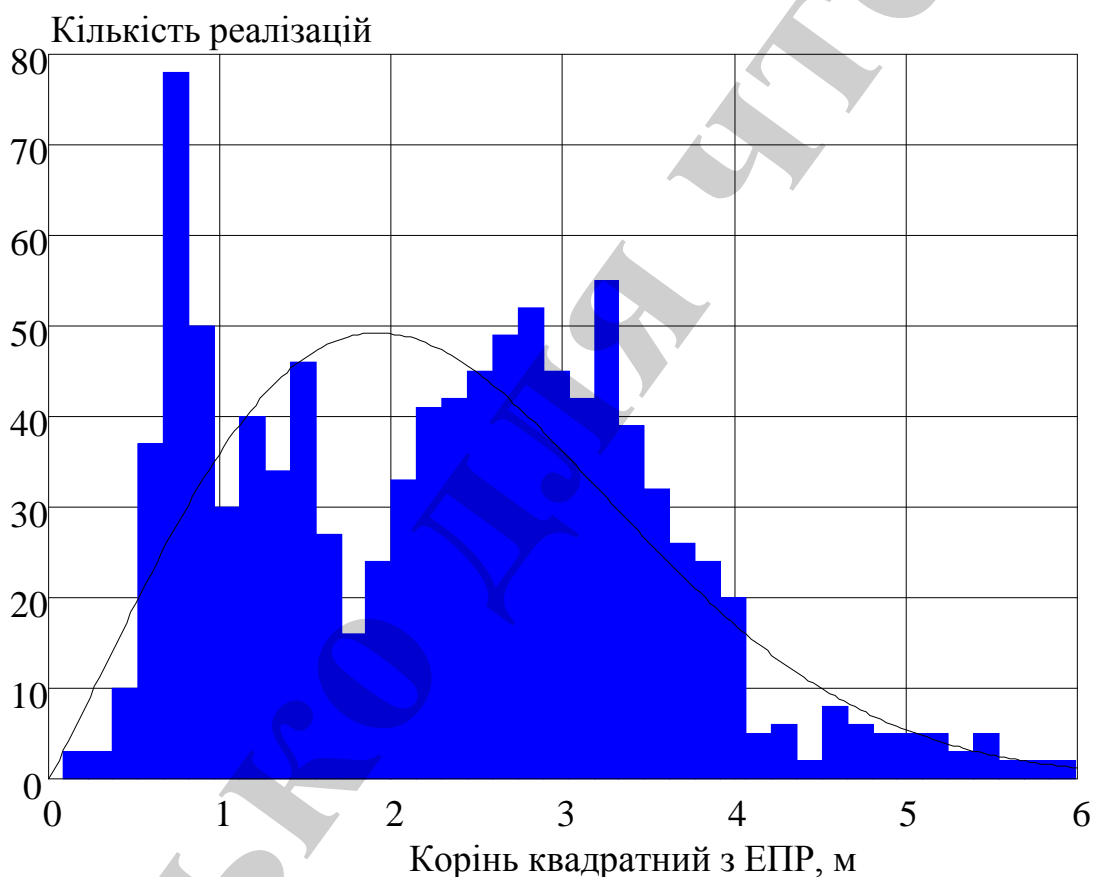


Рис. 12. Гістограма амплітудного множника (квадратного кореня зі значень ефективної поверхні розсіювання) відбитого сигналу

Таким чином, радіолокаційні характеристики моделі Су-25Т при частоті опромінення 1ГГц (довжина хвилі 30 см) показані на рис. 7–12. Отримані рисунки складають радіолокаційний портрет протитанкового штурмовика Су-25Т на частоті 1ГГц.

4. 3. 3. Радіолокаційні характеристики моделі штурмовика Су-25Т при частоті опромінення 166 МГц (довжина хвилі 1,8 м)

На рис. 13 приведена кругова діаграма ЕПР моделі ПШ Су-25Т.

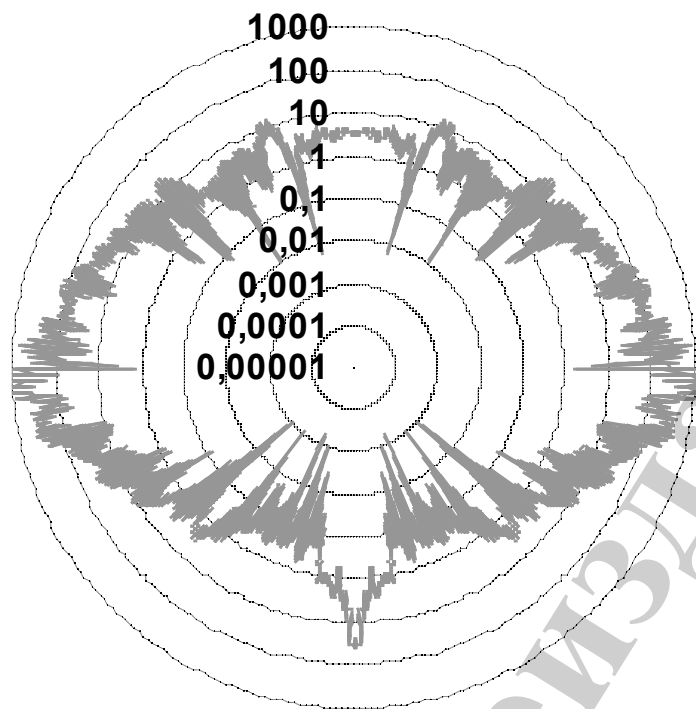


Рис. 13. Кругова діаграма ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

На рис. 14 приведена кругова діаграма НЕПР моделі ПШ Су-25Т.

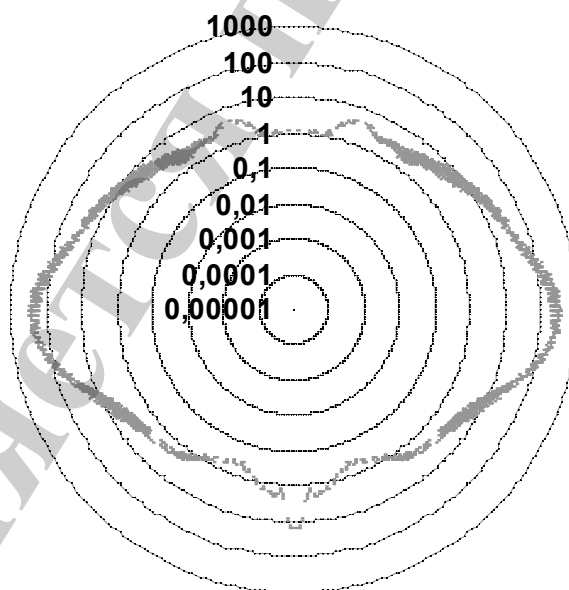


Рис. 14. Кругова діаграма "некогерентної" ефективної поверхні розсіювання моделі протитанкового штурмовика Су-25Т

Середня ЕПР моделі ПШ Су-25Т складає $53,88 \text{ м}^2$; кругова медіанна ЕПР складає $3,85 \text{ м}^2$.

На рис. 15 наведені середні та медіанні значення ЕПР для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст).

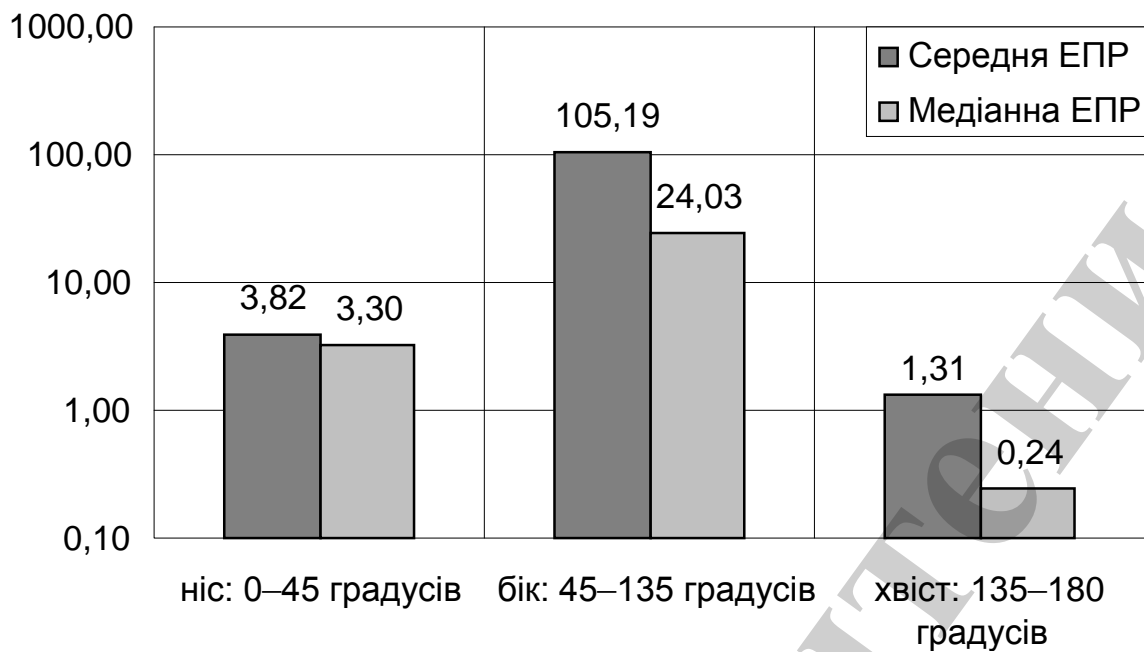


Рис. 15. Середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіювання для головних діапазонів азимутів опромінення (ніс, бік, хвіст)

На рис. 16 наведені середні та медіанні значення ЕПР для діапазонів у 20 градусів.

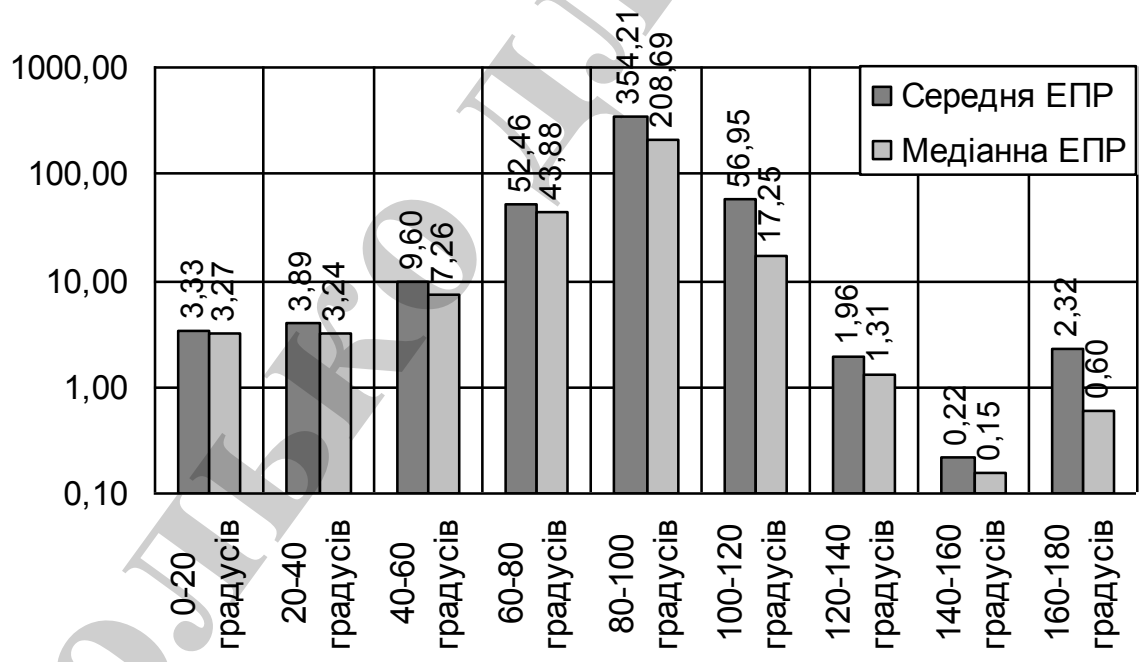


Рис. 16. Середні та медіанні значення ефективної поверхні розсіювання для двадцятиградусних діапазонів азимутів опромінення

На рис. 17 наведена гістограма амплітудного множника (квадратного кореня з ЕПР) відбитого сигналу для діапазону азимутів опромінення –20...+20 градусів (бойові носові ракурси). Жирною лінією наведена функція щільності

ймовірності розподілу, якою можна апроксимувати гістограму амплітудного множника. У даному випадку гістограма амплітудного множника може бути апроксимована за допомогою нормального закону розподілу ймовірності з функцією щільності:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

де $\mu=1,732$; $\sigma=0,980$.

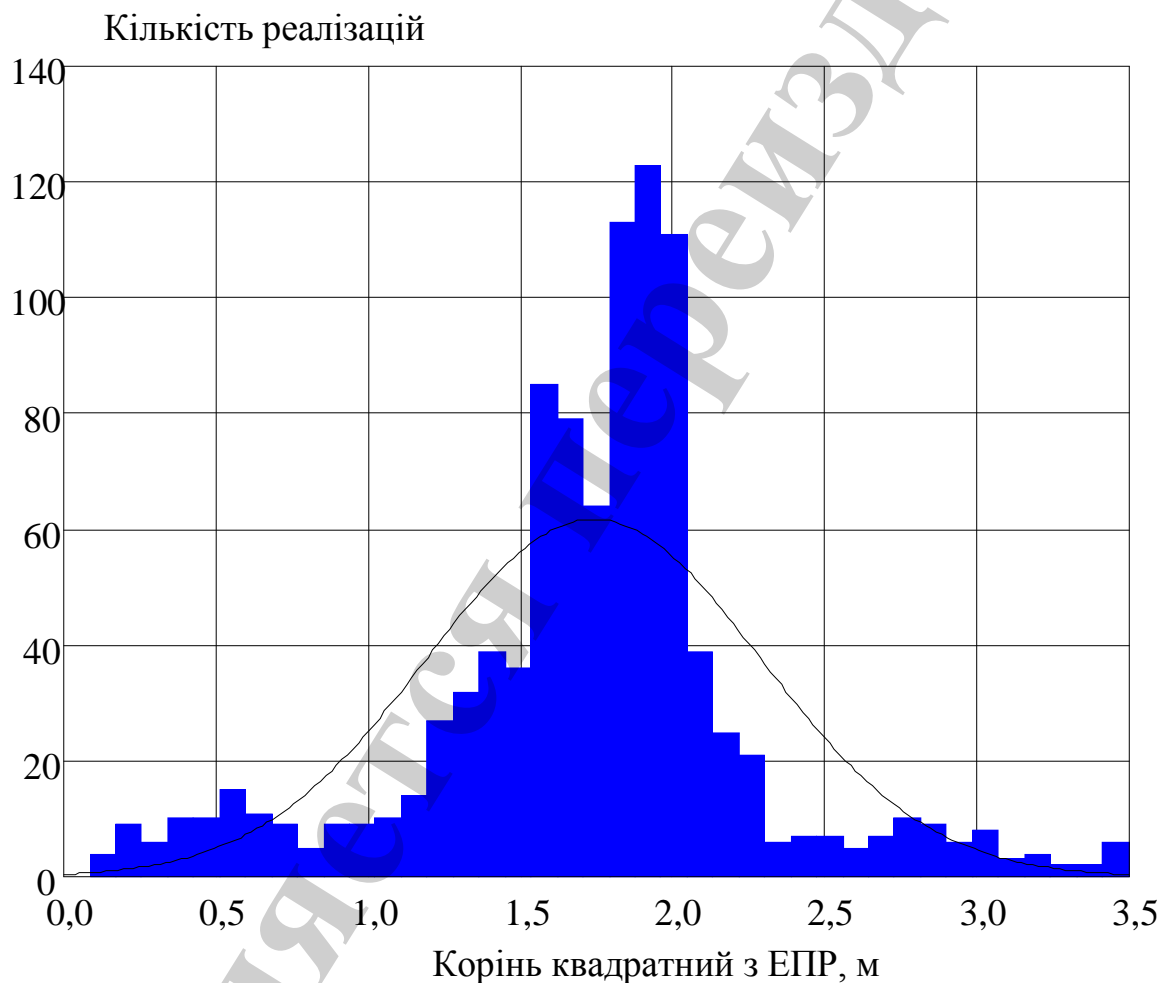


Рис. 17. Гістограма амплітудного множника (квадратного кореня зі значень ефективної поверхні розсіювання) відбитого сигналу

Отже, радіолокаційні характеристики моделі Су-25Т при частоті опромінення 166 МГц (довжина хвилі 1,8 м) показані на рис. 13 – 17. Отримані рисунки складають радіолокаційний портрет протитанкового штурмовика Су-25Т на частоті 166 МГц.

5. Обговорення результатів дослідження характеристик радіолокаційного розсіювання моделі штурмовика Су-25Т у різних діапазонах довжин хвиль

Запропоновано модель і обґрунтовано принцип моделювання, що дозволило отримати радіолокаційні характеристики протитанкового штурмовика Су-25Т при опроміненні сигналами різних частот.

Зазвичай при оцінці характеристик розсіювання електромагнітних хвиль на складних тілах, які частково покриті радіопоглинаючими матеріалами, враховують геометричні розміри. Показано, що радіолокаційні характеристики таких об'єктів значно відрізняються від аналогів відповідних геометричних розмірів. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані з побудовою радіолокаційних портретів літальних об'єктів. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з відсутністю комплексного врахування всієї сукупності домінуючих чинників. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути побудова математичних моделей розсіювання електромагнітних хвиль на складних тілах з використанням елементарних поверхонь. Саме такий підхід використаний у роботі.

Перевагою даного дослідження є отримання характеристик розсіювання протитанкового штурмовика Су-25Т на основі раніше створених високочастотних методів розрахунку з комплексним врахуванням всієї сукупності домінуючих чинників.

При проведенні дослідження була побудована модель поверхні штурмовика Су-25Т з врахуванням геометричних розмірів. Модель складається з гладких частин поверхні та крайових локальних ділянок, а також включає антенну систему, що розташована під носовим діелектричним обтічником. Однак при моделюванні не враховані внутрішні (електромагнітне поле літака при польоті за рахунок випромінювання авіаційного обладнання) та зовнішні (електромагнітні поля, які наводяться від взаємодії з навколишнім середовищем при польоті) впливами. Ці впливи можливо врахувати тільки при проведенні натурного експерименту. Порівняння результатів моделювання та експерименту дозволить внести відповідні зміни до запропонованої моделі.

Подальший розвиток дослідження пропонується направити на внесення необхідних змін до запропонованої моделі та принципів моделювання з врахуванням (теоретичним обґрунтуванням) внутрішніх і зовнішніх впливів під час польоту на радіолокаційні характеристики літальних апаратів.

Все це дає підстави стверджувати про підвищення ефективності виявлення та розпізнавання літальних апаратів.

Дослідження за даною тематикою доцільно проводити для створення радіолокаційних портретів військових літальних апаратів, у тому числі безпілотних.

6. Висновки

1. Результатом дослідження є розроблена модель поверхні протитанкового штурмовика Су-25Т. Показано, що необхідно розбити поверхню літака на дві групи: гладку частину поверхні та крайкові локальні ділянки розсіювання.

Гладка частина поверхні літака була апроксимована за допомогою ділянок 63 трьохвісних еліпсоїдів. Зломи поверхні були промодельовані за допомогою 31 прямої локальної кромкової ділянки розсіяння.

2. Особливістю запропонованих основних розрахункових співвідношень, які складають основу методу отримання радіолокаційних характеристик літального апарату, є врахування зондуючого сигналу, який представляє собою плоску монохроматичну електромагнітну хвилю. Це дозволило вибирати модель поверхні штурмовика так, щоб площа збігалася з поверхнею об'єкта всюди, за винятком околиць зламів, які враховуються окремо. Таким чином, модельована поверхня протитанкового штурмовика Су-25Т є інтегральною сумою двох площин: гладкої частини поверхні літака, поверхні зломів.

3. Визначені особливості впливу опромінення (сантиметрового, дециметрового, метрового діапазонів довжин хвиль) на аналіз радіолокаційних характеристик (радіолокаційного портрету) штурмовика Су-25Т. Так, для довжин хвиль сантиметрового діапазону середня ефективна поверхня розсіяння моделі штурмовика Су-25Т складає $73,31 \text{ м}^2$, а кругова медіанна ЕПР складає $2,86 \text{ м}^2$. Для дециметрового діапазону довжин хвиль опромінення середня ЕПР моделі штурмовика Су-25Т складає $55,13 \text{ м}^2$, кругова медіанна ЕПР складає $2,66 \text{ м}^2$. При опроміненні метрового діапазону довжин хвиль середня ЕПР моделі штурмовика Су-25Т складає $53,88 \text{ м}^2$, кругова медіанна ЕПР складає $3,85 \text{ м}^2$. У радіолокації значення медіанної ЕПР використовується при розрахунках дальності виявлення літака з ймовірністю 0,5. Тому результати дослідження показують, що протитанковий штурмовик Су-25Т найбільш помітний при опроміненні радіолокаційним сигналом метрового діапазону. Це свідчить про практичну спрямованість результатів дослідження.

Література

1. Sukharevsky O. I., Vasilets V. A., Zalevsky G. S. Electromagnetic wave scattering by aerial and ground radar objects // 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/radar.2015.7130989>
2. Залевский Г. С., Василец В. А., Сухаревский О. И. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн // Прикладная радиоэлектроника. 2014. Т. 13, № 1. С. 20–28.
3. Yan S., Jin J.-M., Nie Z. Improving the Accuracy of the Second-Kind Fredholm Integral Equations by Using the Buffa-Christiansen Functions // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2011. Vol. 59, Issue 4. P. 1299–1310. doi: <https://doi.org/10.1109/tap.2011.2109364>
4. Chen W. C., Shuley N. V. Z. Robust Target Identification Using a Modified Generalized Likelihood Ratio Test // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2014. Vol. 62, Issue 1. P. 264–273. doi: <https://doi.org/10.1109/tap.2013.2287019>
5. Munoz-Ferreras J. M., Perez-Martinez F. On the Doppler Spreading Effect for the Range-Instantaneous-Doppler Technique in Inverse Synthetic Aperture Radar Imagery // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2010. Vol. 7, Issue 1. P. 180–184. doi: <https://doi.org/10.1109/lgrs.2009.2030372>

6. Herasimov S. V., Timochko O. I., Khmelevskiy S. I. Synthesis method of the optimum structure of the procedure for the control of technical status of complex systems and complexes // Scientific Works of Kharkiv National Air Force University. 2017. Issue 4 (53). P. 148–152.
7. Sukharevsky O. I., Vasilets V. A., Nechitaylo S. V. Scattering characteristics computation method for corner reflectors in arbitrary illumination conditions // 2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2015. doi: <https://doi.org/10.1109/icatt.2015.7136836>
8. Математическая модель процесса натекания сверхзвукового гетерогенного потока на плоскую преграду / Никитин П. В., Борисов С. А., Добровольский С. В., Глуховская Ю. И. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 10. С. 50–55. doi: <https://doi.org/10.7868/s0207352816100164>
9. Гомзин А. В., Михайлов С. А., Гущина Д. С. Оценка состояния и развития воздушных мишеней для испытаний современных и перспективных комплексов вооружения // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 4. С. 3–6.
10. Обоснование конструктивных решений самолета-истребителя на основе иерархии радиолокационной заметности / Украинец Е. А., Котов А. Б., Анипко О. Б., Ткачов В. В., Онипченко П. Н. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2013. № 1. С. 20–26.
11. Су-25Т // Wikipedia. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Су-25Т>
12. Боевое применение и ТТХ советского истребителя СУ-25. URL: <https://militaryarms.ru/voennaya-texnika/aviaciya/boevoe-primenenie-i-ttx-sovetskogo-istrebitelya-su-25/>