

УДК 623.4.018



І. Є. Ряполов



С. В. Кукобко

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ВИНИЩУВАЧА МіГ-29 ТА БАГАТОЦІЛЬОВОГО ВЕРТОЛЬОТА Мі-8МТ

У статті обґрунтована актуальність дослідження характеристик вторинного випромінювання сучасних повітряних об'єктів за допомогою методів математичного моделювання. Проведено аналіз існуючих методів оцінювання характеристик вторинного випромінювання повітряних об'єктів, які дозволяють досягти поставленої мети – отримати характеристики вторинного випромінювання моделей багатоцільового винищувача МіГ-29 та багатоцільового вертольота Мі-8МТ. Розроблені моделі поверхонь МіГ-29 та Мі-8МТ, наведені основні розрахункові співвідношення. Також наведені результати розрахунку ефективної поверхні розсіювання, «некогерентної» ефективної поверхні розсіювання, середніх та медіанних значень ефективної поверхні розсіювання вказаних радіолокаційних об'єктів для різних частот опромінення зондувального сигналу.

К л ю ч о в і с л о в а : повітряний об'єкт, вторинне випромінювання, ефективна поверхня розсіювання, метод математичного моделювання, характеристики вторинного випромінювання.

Постановка проблеми. Наявність даних про характеристики вторинного випромінювання літального апарата дозволяє вирішувати декілька практичних задач радіолокації. З одного боку, проводити комплекс заходів щодо формування позиційного району підрозділів, які забезпечують розвідувальною та бойовою інформацією частини і підрозділи зенітних ракетних військ та винищувальної авіації. З другого боку, можна отримувати інформацію, яка дозволяє виявити ділянки поверхні об'єкта, що є домінуючими при формуванні характеристик вторинного випромінювання радіолокаційного об'єкта в цілому. Це надає можливість оцінювати ефективність передбачуваних заходів з оптимізації характеристик вторинного випромінювання як всього об'єкта, так і окремих його ділянок.

Існують два методи отримання даних щодо радіолокаційних характеристик повітряних об'єктів: натурні (фізичні) експерименти та математичне моделювання вторинного випромінювання повітряних об'єктів.

Кожен із методів пов'язаний з певними труднощами. Так, проведення натурних (фізичних) експериментів потребує значних матеріальних, організаційних та часових витрат. Основні труднощі при математичному моделюванні вторинного випромінювання моделей повітряних радіолокаційних об'єктів (РЛО) пов'язані з точністю розроблення самої моделі, правильністю її

математичного опису, вибором методу оцінювання характеристик вторинного випромінювання (ХВВ) тощо.

Сучасний рівень розвитку обчислювальної техніки дозволяє використовувати на практиці достатньо складні методи математичного моделювання розрахунку ХВВ зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) з необхідною точністю.

Отже, оцінювання характеристик вторинного випромінювання сучасних повітряних зразків ОВТ є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Отримання ХВВ повітряних РЛО було проведено на основі раніше створених високочастотних методів розрахунку [1, 2, 3], проте, загальним їх недоліком є відсутність комплексного врахування всієї сукупності домінуючих чинників.

У працях [4, 5] запропонований метод розрахунку характеристик розсіювання дзеркальної антени, що знаходиться під радіопрозорим обтічником, який враховує відбиття між апертурою антени та обтічником. Урахування електромагнітних взаємодій між антеною та обтічником дозволяє істотно

точніше розраховувати ефективну поверхню розсіювання (ЕПР) системи «антена – обтічник» і ЕПР всього об'єкта, на якому розташована антена з обтічником.

У працях [6, 7] наведені методи, які дозволяють розраховувати характеристики розсіювання об'єктів складної геометричної форми у вільному просторі з неідеально відбиваючою поверхнею.

Методи, викладені у працях [2, 4–7], засновані на інтегральних поданнях класичної електродинаміки і методах розрахунку ХВВ РЛО у високочастотній області. Вони дозволяють отримувати результати розрахунку характеристик розсіювання повітряних об'єктів з достатньою точністю для практичного застосування.

Метою статті є отримання ХВВ моделей винищувача МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ із застосуванням асимптотичних високочастотних методів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити моделі поверхонь літака МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ, які дозволяють застосовувати методи розрахунку ХВВ РЛО у високочастотній області;
- провести розрахунки ХВВ моделей літака МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ у сантиметровому діапазоні довжин хвиль.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до монографії [5] розрахунок характеристик розсіювання РЛО складної форми за допомогою теоретичних методів включає побудову математичної моделі поверхні досліджуваного об'єкта, вибір методу розрахунку залежно від параметрів математичної моделі поверхні, розрахунок ХВВ (ефективної поверхні розсіювання, діаграми зворотного вторинного випромінювання та ін.).

Вторинне випромінювання радіолокаційного об'єкта повністю характеризується його ЕПР:

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

де $\vec{E}(\vec{R}^0)$ – вектор напруженості електричного поля плоскої електромагнітної хвилі, яка розповсюджується в напрямку орта $\vec{R}^0$;

$\vec{E}^{np}(R \vec{r}^0)$ – вектор напруженості електричного поля електромагнітної хвилі, розсіяної об'єктом

у напрямку орта $\vec{r}^0$ і прийнятої радіолокаційною станцією (РЛС), що розташована на відстані R від досліджуваного об'єкта;

$\vec{p}^{np}$, $\vec{p}$ – орти поляризації відповідно приймальної і передавальної антен.

Ураховуючи прийняту часову залежність $\exp(-j\omega t)$, рівняння Максвелла, які використовуються для розрахунку $\vec{E}^{np}(R \vec{r}^0)$, набувають такого вигляду [2]:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= j\omega \mu \vec{H}, \quad \text{div} \varepsilon \vec{E} = \rho, \\ \text{rot} \vec{H} &= -j\omega \varepsilon \vec{E} + \vec{J}, \quad \text{div} \vec{H} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

де $\vec{J}$ – щільність електричного струму;

ρ – щільність електричного заряду;

ε та μ – абсолютні діелектрична і магнітна проникності середовища.

У разі однорідного середовища з комплексними проникностями ε та μ , вільного від зарядів, кожен з векторів поля $\vec{E}$ і $\vec{H}$ задовольняє векторне рівняння Гельмгольца [6]

$$\text{rot rot} \vec{F} = k^2 \vec{F}, \quad (3)$$

де $\vec{F}$ – або $\vec{E}$, або $\vec{H}$;

$$k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon.$$

Рішення задачі розсіювання полягає у знаходженні рішення рівняння (3), що задовольняє задані граничні умови на поверхні розсіювача і відповідають умовам випромінювання на нескінченності.

Якщо розсіювач, поміщений у вільний простір, має кінцеву провідність, то, позначивши поле всередині розсіювача через $(\vec{E}_i, \vec{H}_i)$, а поза ним через $(\vec{E}_e, \vec{H}_e)$, можна записати граничні умови на поверхні розсіювача:

$$\begin{aligned}\vec{n} \cdot (\vec{E}_e - \vec{E}_i) &= 0; \quad \vec{n} \cdot (\vec{H}_e - \vec{H}_i) = 0; \\ \left[\vec{n} \times (\vec{E}_e - \vec{E}_i) \right] &= 0; \quad \left[\vec{n} \times (\vec{H}_e - \vec{H}_i) \right] = 0,\end{aligned}\tag{4}$$

де $\vec{n}$ – орт зовнішньої нормалі до поверхні розсіювача.

Для ідеально провідних розсіювачів (провідність нескінченно велика) поле всередині розсіювача дорівнює нулю і умови (4) зводяться до таких:

$$\left[\vec{n} \times \vec{E}_e \right] = 0; \quad \vec{n} \cdot \vec{H}_e = 0.\tag{5}$$

У ході розв'язання задач розсіювання істотним є співвідношення довжини хвилі зондуючого сигналу λ і характерного геометричного розміру досліджуваного об'єкта L .

Відповідно до наступних співвідношень зазвичай розрізняють три характерні області: $L / \lambda \ll 1$ – релеївську, $L / \lambda \approx 1$ – резонансну, $L / \lambda \gg 1$ – квазіоптичну (високочастотну) [1, 2].

Геометричні розміри літака МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ відповідають умові, коли розміри розсіювача значно більше за довжину хвилі зондування сантиметрового діапазону. Тому, враховуючи співвідношення довжини хвилі зондуючого сигналу і геометричних розмірів РЛО, застосовуються методи розрахунку характеристик розсіювання саме для квазіоптичної (високочастотної) області.

Моделювання поверхонь літака МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ

1. Опис літака МіГ-29 та модель його поверхні

МіГ-29 – багатоцільовий винищувач четвертого покоління, призначений для перехоплення повітряних цілей на максимальній дальності при наведенні з землі або автономно, ведення повітряного бою на середніх дистанціях із застосуванням керованих ракет, ведення ближнього високоманевреного повітряного бою з застосуванням ракет та бортової гарматної установки [8].

Літак МіГ-29 виконаний за нормальною аеродинамічною схемою з трапецієподібним крилом, двома турбореактивними двигунами в хвостовій частині і двокілевим оперенням. Фюзеляж полумонококової конструкції. На винищувачі застосований ціліноповоротний диференційно відхиляємий стабілізатор, планер літака складається з розвинутого за довжиною і розмахом профільованого несучого корпусу [9].

Довжина винищувача зі штангою приймача повітряного тиску 17,32 м, розмах крила 11,36 м, висота літака 4,73 м, площа крила 38,06 м² [9].

Бортова РЛС Н-091ЕА розташована в передній частині фюзеляжу і закрита радіопрозорим конічним обтічником. Блоки РЛС розташовані у відсіку, розташованому у фюзеляжі безпосередньо за антеною.

Антенна система (рис. 1) виконана за зворотною схемою Кассегрена [9]. Основне дзеркало антенної системи являє собою ділянку параболоїда обертання діаметром 71 см і глибиною 1 см. Обтічник антенної системи (рис. 2) виконано зі склотканини, він має такі параметри: довжина 1,91 м, діаметр біля основи 0,9 м, товщина стінки 9 мм, відносна діелектрична проникність $\varepsilon \approx 3$. Вісь обтічника нахилена вниз відносно осі фюзеляжу на 9°.



Рисунок 1 – Антенна система РЛС Н-091ЕА «Рубін»



Рисунок 2 – Радіопрозорий конічний обтічник МіГ-29

Багатоцільовий винищувач МіГ-29 та модель його поверхні подані на рис. 3 та рис. 4 відповідно.



Рисунок 3 – Багатоцільовий винищувач МіГ-29

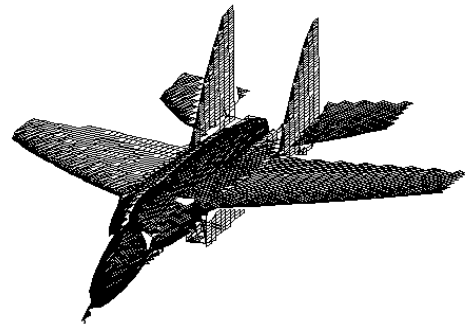


Рисунок 4 – Модель поверхні багатоцільового винищувача МіГ-29

Моделювання поверхні проводилось згідно з методикою, яка наведена в монографії [5]. Ця методика передбачає розбиття поверхонь, що розсіюють, та елементів об'єкта на дві групи: гладку частину поверхні і крайкові локальні ділянки розсіювання. Гладка частина поверхні літака була апроксимована за допомогою ділянок 23-х тривісних еліпсоїдів. Зломи поверхні були промодельовані за допомогою 42-х прямих локальних кромкових ділянок розсіювання. Крім того, окремо було проведено моделювання поверхні антенної системи під радіопрозорим конічним обтічником, яка апроксимована ділянкою параболоїда обертання [10].

2. Опис вертольота Мі-8МТ та модель його поверхні

Багатоцільовий вертоліт Мі-8МТ виконаний за одногвинтовою схемою з рульовим гвинтом, двома газотурбінними двигунами і трьохопорним шасі [11].

Фюзеляж вертольота каркасної конструкції, складається з носової і центральної частин, хвостової і кінцевої балок. Довжина фюзеляжу 18,17 м, висота 4,38 м, ширина 2,5 м. Хвостова балка клепаної конструкції балочно-стрінгерного типу з працюючою обшивкою, забезпечена вузлами для кріплення керованого стабілізатора і хвостової опори [12].

Стабілізатор розміром 2,7 м, площею 2 м² з профілем NASA 0012 однолонжеронної конструкції, з набором нервюр, а також дюралюмінієвою і полотняною обшивками [12].

Шасі триопорне. Передня опора самоорієнтована, з двома колесами, розміри яких 535 мм×185 мм. Головні опори форменого типу з рідинно-газовими двокамерними амортизаторами і колесами, розміри яких 865 мм×280 мм [12].

Несучий гвинт діаметром 21,29 м п'ятилопатевий з шарнірним кріпленням лопатей, гідравлічними демпферами і маятниковими гасителями коливань, встановлений з нахилом уперед 4°30'. Суцільнометалеві лопаті складаються з пресованого лонжерона з алюмінієвого сплаву АВТ-1, зміцненого наклепом сталевими шарнірами на вібростенді. Лопаті мають прямокутну форму в плані з хордою 0,52 м і профілями NASA 230 з відносною товщиною від 12 % до 11,38 % і геометричним крученням 5 % [12].

Рульовий гвинт діаметром 3,9 м трилопатевий, штовхаючий, з втулкою карданного типу і суцільнометалевими лопатями прямокутної форми в плані з хордою 0,26 м і профілем NASA 230М [12].

Багатоцільовий вертоліт Мі-8МТ та його модель поверхні подані на рис. 5 та рис. 6 відповідно.

При моделюванні відповідно до праць [5, 10, 13] гладка частина поверхні вертольота була апроксимована за допомогою ділянок 96-ти тривісних еліпсоїдів. Зломи поверхні були промодельовані за допомогою 11-ти прямих кромкових ділянок розсіювання.



Рисунок 5 – Багатоцільовий вертоліт Мі-8МТ



Рисунок 6 – Модель поверхні багатоцільового вертольота Мі-8МТ

Результати розрахунку характеристик вторинного випромінювання моделі літака МіГ-29 та моделі вертольота Мі-8МТ

Розрахунок характеристик вторинного випромінювання моделі літака МіГ-29 та моделі вертольота Мі-8МТ проводився для таких параметрів:

- кут місця зондування 3° відносно площини горизонту (зондування з нижньої напівсфери);
- крок зміни азимута зондування 1° , азимут відраховується в градусах від носового ракурсу (0° – зондування в ніс, 180° – зондування у хвіст);
- поляризація горизонтальна.

Наводяться такі ХВВ: залежність ЕПР і «некогерентної» ЕПР від азимута спостереження; середні і медіанні значення ЕПР для головних діапазонів азимутів опромінення: ніс: від 0° до 45° ; бік: від 45° до 135° ; хвіст: від 135° до 180° .

Під «некогерентною» ЕПР (НЕПР) розуміється сума ЕПР окремих ділянок поверхні, яка не враховує взаємних фазових набігів. Під медіанним значенням ЕПР у конкретному секторі кутів опромінення розуміється деяке не випадкове значення ЕПР, ймовірність перевищення і не перевищення якого випадковою величиною ЕПР у заданому секторі кутів становить 0,5 [6].

Медіанне значення ЕПР використовується у розрахунках дальності виявлення цілей радіолокаційними засобами.

Усі зазначені характеристики наведені для випадку сумісного прийому.

1. Результати розрахунку ХВВ моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см).

Залежності ЕПР та НЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування наведені на рис. 7 та рис. 8 відповідно.

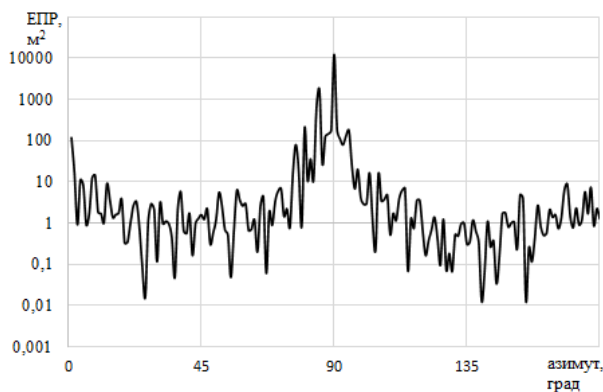


Рисунок 7 – Залежність ЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування

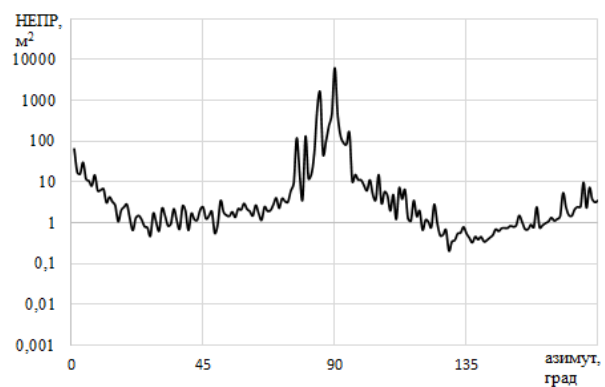


Рисунок 8 – Залежність НЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування

Середні та медіанні значення ЕПР та НЕПР моделі літака МіГ-29 для головних діапазонів азимутів опромінення наведені на рис. 9 та рис. 10 відповідно.

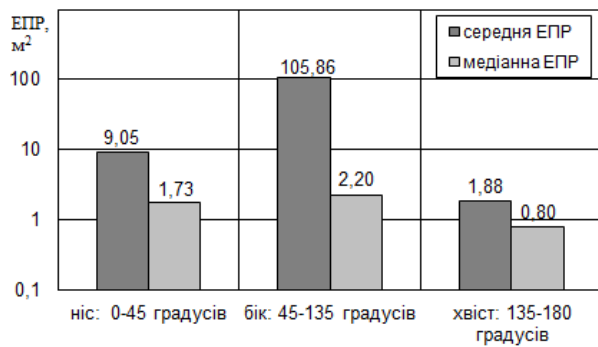


Рисунок 9 – Середні та медіанні значення ЕПР моделі літака МіГ-29

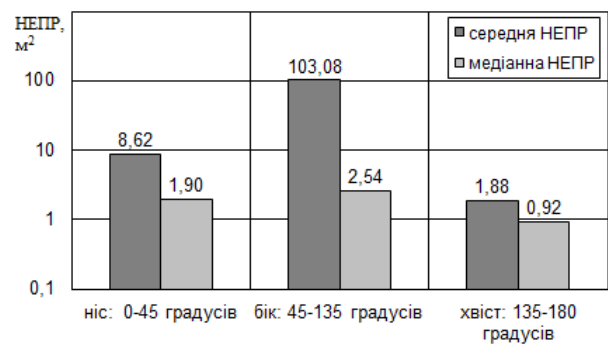


Рисунок 10 – Середні та медіанні значення НЕПР моделі літака МіГ-29

У результаті проведеного дослідження щодо розрахунку ХВВ моделі літака МіГ-29 встановлено, що середня ЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 55,67 м². Середня НЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 54,17 м².

При оцінюванні середніх значень ЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,05 м²; для бокового ракурсу – 105,86 м²; для хвостового ракурсу – 1,88 м².

При оцінюванні медіанних значень ЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 1,73 м²; для бокового ракурсу – 2,20 м²; для хвостового ракурсу – 0,80 м².

При оцінюванні середніх значень НЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 8,62 м²; для бокового ракурсу – 103,08 м²; для хвостового ракурсу – 1,88 м².

При оцінюванні медіанних значень НЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 1,90 м²; для бокового ракурсу – 2,54 м²; для хвостового ракурсу – 0,92 м².

2. Результати розрахунку ХВВ моделі літака МіГ-29 при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см).

Залежності ЕПР та НЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування наведені на рис. 11 та рис. 12 відповідно.

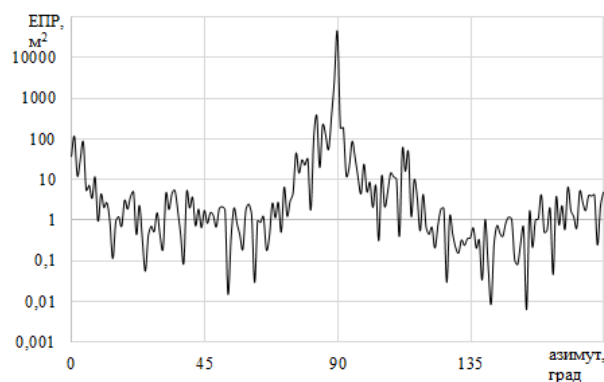


Рисунок 11 – Залежність ЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування

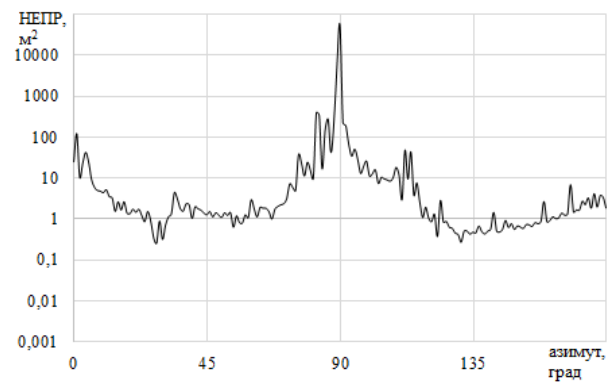


Рисунок 12 – Залежність НЕПР моделі літака МіГ-29 від азимута зондування

Середні та медіанні значення ЕПР та НЕПР моделі літака МіГ-29 для головних діапазонів азимутів опромінення наведені на рис. 13 та рис. 14 відповідно.

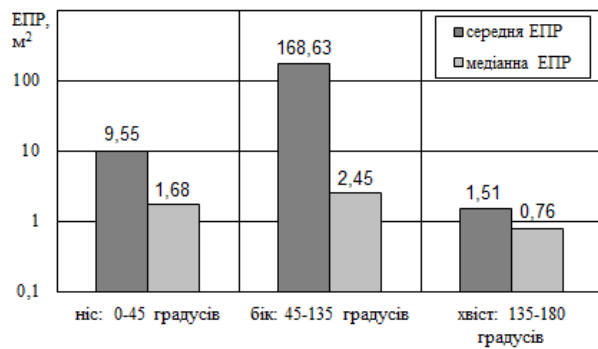


Рисунок 13 – Середні та медіанні значення ЕПР моделі літака МіГ-29

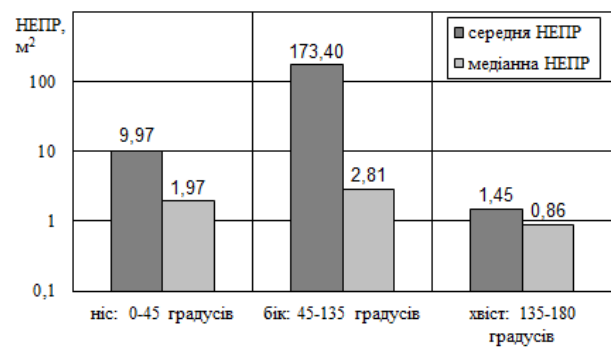


Рисунок 14 – Середні та медіанні значення НЕПР моделі літака МіГ-29

У результаті проведеного дослідження щодо розрахунку ХВВ моделі літака МіГ-29 встановлено, що середня ЕПР по колу при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) складає 87,09 м². Середня НЕПР по колу при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) складає 89,57 м².

При оцінюванні середніх значень ЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,55 м²; для бокового ракурсу – 198,63 м²; для хвостового ракурсу – 1,51 м².

При оцінюванні медіанних значень ЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 1,68 м²; для бокового ракурсу – 2,45 м²; для хвостового ракурсу – 0,76 м².

При оцінюванні середніх значень НЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,97 м²; для бокового ракурсу – 173,40 м²; для хвостового ракурсу – 1,45 м².

При оцінюванні медіанних значень НЕПР моделі літака МіГ-29 для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 1,97 м²; для бокового ракурсу – 2,81 м²; для хвостового ракурсу – 0,86 м².

Результати проведених досліджень показують, що зі зменшенням частоти опромінення літака МіГ-29 з 10 ГГц до 3 ГГц значення ЕПР суттєво збільшуються.

3. Результати розрахунку ХВВ моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см)

Залежності ЕПР та НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування наведені на рис. 15 та рис. 16 відповідно.

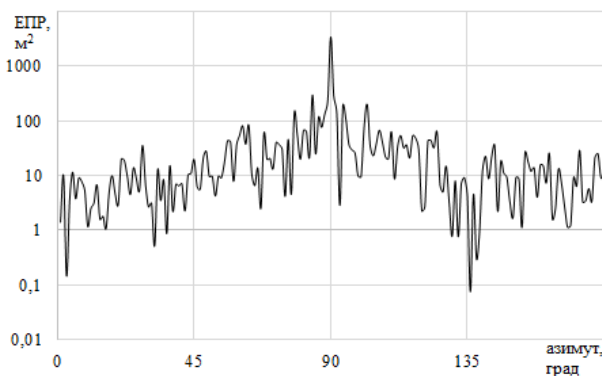


Рисунок 15 – Залежність ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування

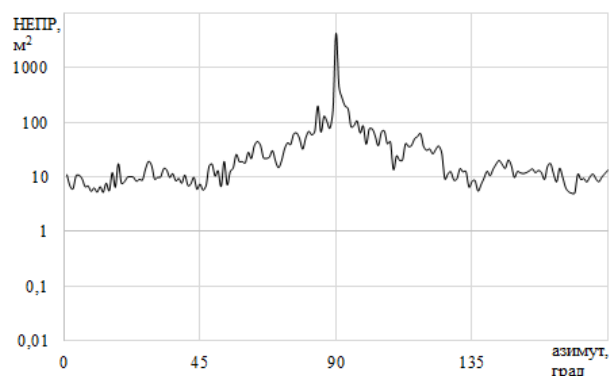


Рисунок 16 – Залежність НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування

Середні та медіанні значення ЕПР та НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для головних діапазонів азимутів опромінення наведені на рис. 17 та рис. 18 відповідно.

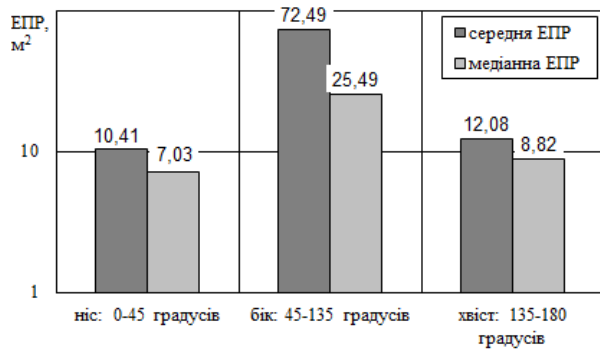


Рисунок 17 – Середні та медіанні значення ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ

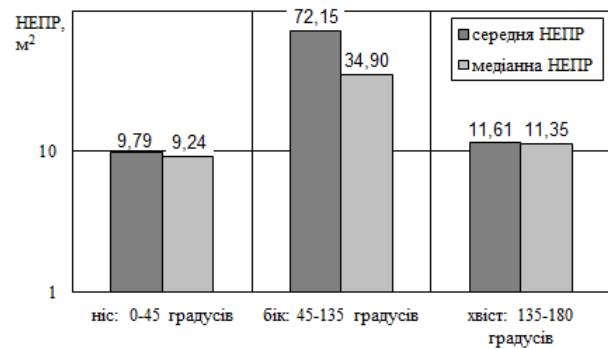


Рисунок 18 – Середні та медіанні значення НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ

У результаті проведеного дослідження щодо розрахунку ХВВ моделі вертольота Мі-8МТ встановлено, що середня ЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 41,80 м². Середня НЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 12,54 м².

При оцінюванні середніх значень ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 10,41 м²; для бокового ракурсу – 72,49 м²; для хвостового ракурсу – 12,08 м².

При оцінюванні медіанних значень ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 7,03 м²; для бокового ракурсу – 25,49 м²; для хвостового ракурсу – 8,82 м².

При оцінюванні середніх значень НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,79 м²; для бокового ракурсу – 72,15 м²; для хвостового ракурсу – 11,61 м².

При оцінюванні медіанних значень НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,24 м²; для бокового ракурсу – 34,90 м²; для хвостового ракурсу – 11,35 м².

4. Результати розрахунку ХВВ моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см)

Залежності ЕПР та НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування наведені на рис. 19 та рис. 20 відповідно.

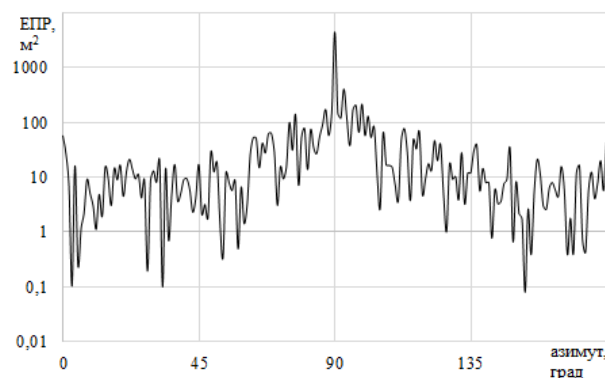


Рисунок 19 – Залежність ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування

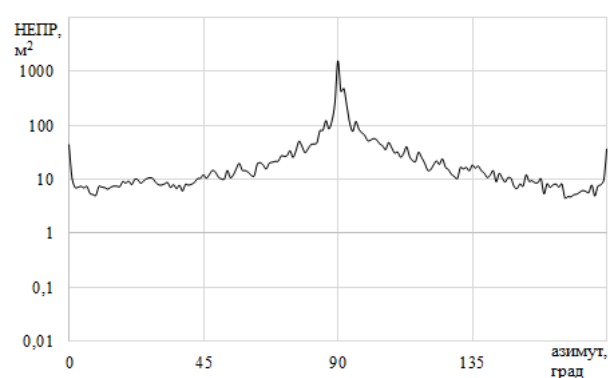


Рисунок 20 – Залежність НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ від азимута зондування

Середні та медіанні значення ЕПР та НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для головних діапазонів азимутів опромінення наведені на рис. 21 та рис. 22 відповідно.

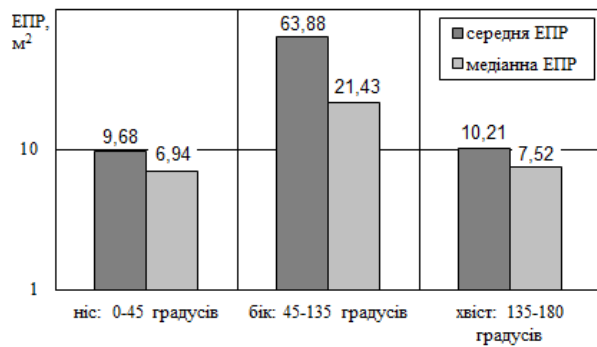


Рисунок 21 – Середні та медіанні значення ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ

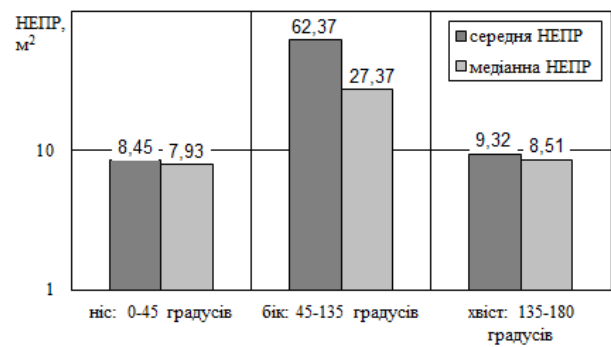


Рисунок 22 – Середні та медіанні значення НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ

У результаті проведеного дослідження щодо розрахунку ХВВ моделі вертольота Мі-8МТ встановлено, що середня ЕПР по колу при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) складає 36,81 м². Середня НЕПР по колу при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) складає 11,25 м².

При оцінюванні середніх значень ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 9,68 м²; для бокового ракурсу – 63,88 м²; для хвостового ракурсу – 10,21 м².

При оцінюванні медіанних значень ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 6,94 м²; для бокового ракурсу – 21,43 м²; для хвостового ракурсу – 7,52 м².

При оцінюванні середніх значень НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 8,45 м²; для бокового ракурсу – 62,37 м²; для хвостового ракурсу – 9,32 м².

При оцінюванні медіанних значень НЕПР моделі вертольота Мі-8МТ для частоти опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) встановлено: для носового ракурсу вона складає 7,93 м²; для бокового ракурсу – 27,37 м²; для хвостового ракурсу – 8,51 м².

Результати проведених досліджень показують, що зі зменшенням частоти опромінення вертольота Мі-8МТ з 10 ГГц до 3 ГГц значення ЕПР суттєво збільшуються.

Висновки

У статті наведено результати дослідження щодо отримання ХВВ (ЕПР, «некогерентної» ЕПР, середніх та медіанних значень ЕПР) моделей багатоцільового винищувача МіГ-29 та вертольота Мі-8МТ із застосуванням методів, викладених у працях [2, 4–7].

Результати досліджень показують таке:

– середня ЕПР моделі літака МіГ-29 по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 55,67 м², а при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) – 87,09 м²; середня НЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 54,17 м², а при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) – 89,57 м²;

– середня ЕПР моделі вертольота Мі-8МТ по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 41,80 м², а при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) – 36,81 м²; середня НЕПР по колу при частоті опромінення 10 ГГц (довжина хвилі 3 см) складає 12,54 м², а при частоті опромінення 3 ГГц (довжина хвилі 10 см) – 11,25 м².

Зі збільшенням частоти опромінення середня ЕПР зменшується, а залежність ЕПР від кута опромінення стає більш пальною.

Отримані результати можуть бути використані для модернізації розглянутого об'єкта та на етапах проектування перспективних повітряних зразків озброєння військової техніки схожої конфігурації з метою зниження радіолокаційної помітності.

Перелік джерел посилання

1. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Сиренко Ю. К., Сухаревский И. В., Сухаревский О. И., Яшина Н. П. Харків : Крок, 2000. 344 с.
2. Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects / S. V. Nechitaylo et al. ed. Boca Raton, USA : SRC Press Taylor & Francis Group, 2014. 334 p.
3. Ufimtsev P. Ya. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction, 2nd Edition. Hoboken : Wiley-IEEE Press. 2014. 496 p.
4. Ряполов І. Є., Нечитайло С. В., Костріков О. Л. Метод розрахунку характеристик розсіювання дзеркальної антени, що знаходиться під радіопрозорим обтічником. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 4 (6). С. 97 – 102. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.06.2024.12>.
5. Вторинне випромінювання безпілотних літальних апаратів (математичне моделювання) : монографія / О. І. Сухаревський та ін. Харків : ХАІ, 2022. 270 с.
6. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами : монография / О. И. Сухаревский и др. Харків : ХНУПС, 2009. 468 с.
7. Ряполов І. Є., Ряполов Є. І., Боднар С. І. Високочастотні методи розрахунку характеристик розсіювання складних повітряних радіолокаційних об'єктів. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 1 (3). С. 85 – 95. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.12>.
8. МіГ-29. URL: <https://surl.li/kfouli> (дата звернення: 02.04.2025).
9. Іванов С. В. МіГ-29. 2015. *Серія: Війна в повітрі*. URL: <https://surl.li/uwxgyh> (дата звернення: 02.04.2025).
10. Моделювання геометрії поверхні безпілотних літальних апаратів, конструкція яких містить елементи з різними електрофізичними властивостями / Ряполов І. Є., Василець В. О., Кукобко С. В., Боднар С. І. *Випробування та сертифікація*. 2024. № 2 (4). С. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.13>.
11. Мі-8. URL: <https://surl.li/dbujwg> (дата звернення: 02.04.2025).
12. Миль Ми-8 1959. URL: <https://surl.li/fqgyzi> (дата звернення: 02.04.2025).
13. Scattering characteristics of Mi-8MT helicopter based on measurements of object scale model in an anechoic chamber / Sukharevsky O., Vasilets V., Ryapolov I., Brechka M. *Системи обробки інформації*. 2017. № 1. С. 109 – 114. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.20>.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2025 р.

UDC 623.4.018

I. Riapolov, S. Kukobko

**CHARACTERISTICS OF SECONDARY RADIATION MODEL SOF THE MiГ-29
MULTIROLE FIGHTER AND THE Mi-8MT MULTIROLE HELICOPTER**

The availability of data on the characteristics of aircraft secondary radiation allows solving several practical radar tasks. On the one hand, it is possible to carry out a set of measures to form a positional area for units that provide intelligence and combat information to units of anti-aircraft missile forces and fighter aircraft. On the other hand, it is possible to obtain information that allows to identify the areas of the object's surface that make a dominant contribution to the backscatter of the radar object as a whole. This makes it possible to evaluate the effectiveness of the proposed measures to optimise the secondary radiation characteristics of the entire object and its individual sections.

The current level of development of computer technology makes it possible to solve this problem and implement sufficiently complex methods of mathematical modelling of secondary radiation from airborne objects with the necessary accuracy for practical use.

The paper analyses existing methods for estimating the secondary radiation characteristics of airborne objects, which allow obtaining the secondary radiation characteristics of the MiГ-29 multi-purpose fighter and Mi-8MT multi-purpose helicopter models. Methods based on integral representations of classical electrodynamics and their short-wave asymptotics have a number of advantages. The models of the surfaces of the MiГ-29 aircraft and the Mi-8MT multipurpose helicopter were developed and the characteristics of the secondary radiation of the radar objects under study were calculated in the centimetre wavelength

range.

The results of calculating the characteristics of secondary radiation (radar cross-section, 'incoherent' radar cross-section, mean and median values of the radar cross-section) of the specified radar objects for different irradiation frequencies of the probing signal are presented. It was found that with increasing irradiation frequency, the average radar cross-section decreases, and the dependence of the radar cross-section on the irradiation angle becomes smoother.

The obtained results can be used to assess the capabilities of radar systems for detecting, tracking and recognising airborne objects of this type. In addition, the use of the obtained results may allow to optimise the design of aircraft in order to reduce their radar visibility.

K e y w o r d s : air object, secondary radiation, radar cross-section, mathematical modelling method, characteristics of secondary radiation.

Ряполов Іван Євгенович – кандидат технічних наук, старший дослідник, докторант штатний Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки.

<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>

Кукобко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник відділу ТОВ «Юей Дефенс».

<https://orcid.org/0000-0001-6289-4458>