

УДК 621.396

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.2\(26\).78-83](https://doi.org/1034169/2414-0651.2020.2(26).78-83)**Р. В. БУБЕНЩИКОВ**, старший викладач<https://orcid.org/0000-0001-6610-0360>**В. А. ЮНДА**, кандидат технічних наук,
старший викладач<https://orcid.org/0000-0002-8941-823X>**О. В. МАЙСТРЕНКО**, доктор військових наук,
начальник кафедри<https://orcid.org/0000-0002-9900-5930>**С. В. СТЕЦІВ**, кандидат технічних наук,
викладач<https://orcid.org/0000-0003-1835-9874>(Національна академія сухопутних військ імені
гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів)**Л. С. ДАВИДОВСЬКИЙ**, кандидат технічних
наук, старший науковий співробітник<https://orcid.org/0000-0002-2529-1989>(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Розсіювання радіохвиль на тілах складної форми

В роботі розглядаються питання поширення електромагнітних хвиль в просторі та їх розсіювання на об'єктах локації складної електрофізичної структури і просторової конфігурації природного і антропогенного характеру. Визначаються ймовірні характеристики розсіяного поля. Складність просторової конфігурації цілей зумовлює використання чисельних методів в якості основи побудови розрахункової методики оцінки радіолокаційних полів розсіювання.

Ключові слова: радіолокація, електромагнітне випромінювання, об'єкт локації, розсіювання електромагнітних хвиль, об'єкт розсіювання, діаграма зворотного розсіювання.

Актуальність досліджень

Радіофізика і радіолокація, як галузі природознавства, в сучасних умовах повсюдного поширення і використання інформаційних технологій представляють собою наукову, методичну та технологічну основу, на якій модернізуються існуючі і створюються принципово нові системи радіозв'язку, навігації, дистанційного зондування і локації. Саме тут вивчаються питання поширення електромагнітних хвиль в просторі та їх розсіювання на об'єктах локації складної електрофізичної структури і просторової конфігурації природного і антропогенного характеру.

В силу своєї складності і багатогранності, рішення цих проблем історично було обмежено дослідженнями фундаментального характеру, пов'язаних або з рішенням канонічних задач дифракції на об'єктах простої форми, або з розробкою спрощених методів, що не забезпечують необхідну точність результатів.

Питання проектування і оцінки ефективності сучасних систем радіолокації практично неможливо вирішити без апріорного знання характеристик розсіювання об'єктів локації.

Існує два основні способи отримання необхідної інформації: експериментальні дослідження, пов'язані з вимірами полів розсіювання реальних об'єктів на полігонах, в безехових камерах і т.д. та теоретичні дослідження, засновані на визначеному або наближеному вирішенні задачі дифракції електромагнітних хвиль. Так як перший метод припускає наявність реального об'єкта розсіювання або його достатньо гарного макета, то цей метод, поряд зі своїми значними економічними, організаційними і фізичними витратами, практично непридатний на ранніх стадіях проектування як нових аеродинамічних об'єктів, так і систем локації. Тому методи математичного моделювання, які сприяють у вирішенні таких завдань, знаходять все більшого застосування.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого отриманню характеристик розсіювання повітряних об'єктів на основі математичної моделі розсіювання радіохвиль на об'єктах складної форми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел [1–6] дозволяє зробити висновок, що в даний час накопичено величезний науково-практичний потенціал в області обчислювальних методів і засобів, що дозволяє ефективно поширювати результати фундаментальних досягнень радіофізики та радіолокації при вирішенні прикладних задач. Однак, вирішення задач розсіювання електромагнітного випромінювання (ЕМВ) на реальних об'єктах локації складної електрофізичної структури і просторової конфігурації з урахуванням впливу підстильної поверхні за допомогою безпосереднього застосування фундаментальних методів електродинаміки не ефективно і практично неможливо навіть на сучасних потужних ЕОМ. Тому, завдання дослідження, спрямовані на розробку ефективних, універсальних і сучасних методів аналізу полів розсіювання об'єктів локації (ОЛ) найширшого класу і орієнтованих на широке і раціональне використання

сучасних розрахункових методів і засобів, представляють виняткову важливість і актуальність.

Метою статті є аналіз методів дослідження розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах локації складної електрофізичної структури і форми природного та антропогенного характеру, заснованих на широкому використанні і розвитку найбільш ефективних сучасних асимптотичних методів електродинаміки, розвиток і використання сучасних обчислювальних методів і засобів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Реальний об'єкт розсіювання складної просторової конфігурації можна представити у вигляді сукупності поверхонь S_1, S_2, \dots, S_n , які обмежують довільну однорідну та ізотропну область u , всередині якої визначено довільний розподіл джерел збудження. Джерелами поля, в загальному випадку, є як електричний струм \vec{J}_B і заряди ρ_a , так і магнітний струм \vec{J}_m і заряди ρ_m . Всі поля є стаціонарними і гармонійними з тимчасовою залежністю виду $\exp(-i\omega)t$, ω – кругова частота, тоді вектори напруженості електричного і магнітного полів \vec{H} в довільній точці P всередині області u є рішеннями двох симетричних хвильових диференціальних рівнянь:

$$\text{rot}(\text{rot}\vec{E}) - k^2 \cdot \vec{E} = i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \vec{J}_B - \text{rot}(\vec{J}_m) \quad (1)$$

$$\text{rot}(\text{rot}\vec{H}) - k^2 \cdot \vec{H} = i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \vec{J}_m - \text{rot}(\vec{J}_B), \quad (2)$$

де ε, μ – електрична і магнітна проникність, відповідно, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число, а λ – довжина хвилі. Нехай S_n^+ освітлюється джерелом, що знаходиться в точці P , і не затінено поверхнями S_1, S_2, \dots, S_n , частина внутрішньої поверхні сфери нескінченно великого радіуса обмежує обсяг u . Позначимо сукупність освітлених (хоча б частково) розсіювальних елементів як $L^+ : S_1^+, S_2^+, \dots, S_{n-1}^+$. Для застосування теореми Гріна утворюємо замкнуту область u^+ , обмежену поверхнями S_n^+, L^+ і замикаємо поверхнею S^- , яка утворює конус геометричної тіні. В силу відсутності джерел збудження на поверхні S^- і в силу умов випромінювання на S_n^+ , розсіюванням на цих поверхнях можна знехтувати. Тоді рішення рівнянь можуть бути отримані за допомогою векторної теореми Гріна [7–8] в узагальненому вигляді для замкнутої області u^+ :

$$\vec{A}_p = \frac{1}{4\pi} \cdot \int F(\vec{J}_B^s, \vec{J}_m^s, z_B, z_m, G) dS, \quad (3)$$

розуміючи під вектором \vec{A} або \vec{E} , або \vec{H} , в якому всі компоненти є функціями координат. Тут $G = \frac{\exp(i\omega \cdot r)}{r}$ – функція точкового джерела Гріна, \vec{N} – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні $L : S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n$, при цьому джерелами збудження поля в інтегралі за обсягом є сторонні джерела $\vec{J}_B, \vec{J}_m, \rho_B, \rho_m$, а в поверхні – інтеграли – індуковані поверхневі джерела збудження, які можна трактувати як $\vec{J}_B^s = [\vec{N}, \vec{H}_s]$, $\vec{J}_m^s = [\vec{N}, \vec{E}_s]$ – поверхневі електричний і магнітний струм, а $\sigma_e = -\varepsilon \cdot (\vec{N}, \vec{E}_s)$, $\sigma_m = \mu \cdot (\vec{N}, \vec{E}_s)$ – поверхневі електричні

і магнітні заряди. У загальному випадку інтеграл (3) не вдається обчислити і тому доцільно скористатися асимптотичними методами оцінок поверхневих інтегралів першого роду. З огляду на лінійність інтеграла (3), можна представити інтеграл по L^+ у вигляді суми інтегралів по кожній з поверхонь S_j^+ , компенсуючи вплив пов'язаних елементів використанням об'ємних інтегралів, які з'являються в контурних інтегралах від крайових струмів збудження J^1 . Тоді інтеграл (3) можна представити в адитивній інтегральній формі по поверхнях $S_j^+ (j = 0, 1, \dots, n-1)$ [9–10]:

$$\vec{E}_p = \frac{1}{4\pi} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left[\int_{S_j^+}^1 \left\{ -i\omega\mu \cdot G \cdot \vec{J}_{Bj}^s + [\vec{J}_{mj}^s, \text{grad}G] - \frac{\sigma_B}{\varepsilon} \right\} dS + \frac{1}{i\omega\varepsilon} \cdot \sum_{k=1}^M \int_{l_k}^1 (\tau_{jk}, H_k^s) \text{grad}G dl \right], \quad (4)$$

$$\vec{H}_p = -\frac{1}{4\pi} \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \left[\int_{S_j^+}^1 \left\{ -i\omega\varepsilon \cdot G \cdot \vec{J}_{mj}^s + [\vec{J}_{Bj}^s, \text{grad}G] - \frac{\sigma_m}{\mu} \text{grad}G \right\} dS + \frac{i}{\omega\mu} \cdot \sum_{k=1}^M \int_{l_k}^1 (\tau_{jk}, E_k^s) \text{grad}G dl \right]. \quad (5)$$

Тут граничні лінійні заряди $\sigma_1 \approx (\tau, A^1)$ задовольняють рівняння безперервності і є джерелами крайових хвиль, утворених опуклими зламами поверхні; M – число пов'язаних з елементом j розсіювачів, що утворюють ребра $l_k (k = 0, 1, \dots, M)$, освітлена частина яких позначена як l_k^+ . Таким чином, залишається визначити джерела збудження J^1 і J^s для повного опису системи (4–5).

Якщо визначати компоненти \vec{E}_s, \vec{H}_s евристичним способом, тобто вважати їх рівними суперпозиції падаючих і відбитих хвиль, які в свою чергу визначаються з променевих формул Френеля, то безпосередньо можна прийти до методу Кірхгофа. Однак, в цьому випадку втрачаються рішення, що обумовлені взаємодією пов'язаних елементів. Щоб цього не сталося, потрібно врахувати, що джерела збудження в формулах (3) – (5) в загальному випадку задовольняють інтегрального рівняння Фока [10–11]:

$$\vec{J}(r) = \vec{J}^0 + \int_S^1 [\vec{J}(\vec{r}_1), \text{grad}G(\vec{r} - \vec{r}_1)] dr_1, \quad (6)$$

Тут \vec{J}^0 – компонент струму, обчисленого в наближенні дотичної площини (Кірхгофа), а \vec{r}_1 – радіус-вектор точки на поверхні, в загальному випадку поєднаної з поточною поверхнею. Таким чином, в першому наближенні, при врахуванні лише дворазових перевідбиттів джерела збудження мають адитивний характер

$$\vec{J}_s(r) = \vec{J}_s^0 + \sum_{k=1}^M \vec{J}_k^g(\vec{r}_k - \vec{r}_j), \quad (7)$$

де \vec{J}_k^g – струм на поверхні j -го елемента, обумовлений впливом k -го елемента. Вигляд (7) узгоджується з відомим методом послідовних ітерацій Франца [3].

Оскільки реальні об'єкти розсіювання мають складну просторову конфігурацію, то обчислення інтегралів виду (4–5) можливо лише з використанням чисельних методів і алгоритмічних процедур. Однак в складі об'єкта можуть бути присутні такі ефективні розсіювачі, що застосування навіть чисельних методів виявляється або не раціонально, або взагалі неможливо. Прикладом таких елементів можуть бути лопаті двигуна

турбіни реактивного літака, антени спеціальної форми і т. п. У цьому випадку в якості характеристики розсіювання елемента доцільно використовувати просторову діаграму розсіювання, яку отримують, або експериментальним, або спеціальними аналітичними методами і яку можна уявити у функціональному вигляді:

$$\vec{A}_r = \hat{O}(\vec{R}, \vec{r}_i) \cdot G, \quad (8)$$

де \vec{R} – вектор умов збудження; \vec{r}_i – радіус-вектор точок на поверхні елемента.

З огляду на вирази (4 – 8) поле розсіювання від сукупності джерел на поверхні об'єкту має вигляд векторної суми чотирьох компонент:

$$\vec{A}_p = \vec{A}_1 + \vec{A}_2 + \vec{A}_3 + \vec{A}_4. \quad (9)$$

На рис. 1 наведені діаграми зворотного розсіювання (ДЗР) малопомітного літака В2, отримані методом математичного моделювання на довжині хвилі 3,2 см і лінійної вертикальної поляризації, для двох значень кута місця (кута підходу цілі). У секторі $0^\circ \dots 90^\circ$ наведено ДЗР, отриману методом когерентного підсумовування елементарних сигналів для кута підходу 15° , а в секторі $0^\circ \dots -90^\circ$ приведена ДЗР для кута підходу -15° .

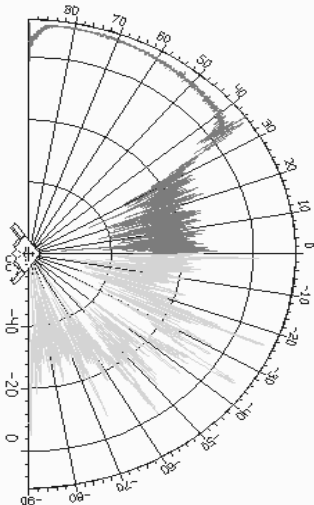


Рис. 1. Діаграма зворотного розсіювання малопомітного літака В2:

$b = 15^\circ$ при $a = 0^\circ \dots 90^\circ$, $b = -15^\circ$, $a = 0^\circ \dots 90^\circ$

У виразі (9) перша компонента поля відповідає внеску в загальне розсіяне поле від гладких елементів поверхні, яка відповідає векторній сумі інтегралів Кіргофа, яку можна уявити у функціональному вигляді:

$$\vec{A}_1 = f_2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \int_{S_j^+} \vec{F}_{1j}(\vec{J}_j^s, \vec{R}_s, f_1, \epsilon, \mu, \vec{r}, G_s) dS, \quad (10)$$

де \vec{F}_{1j} – вектор поверхневих джерел збудження; f_1, f_2 – в загальному випадку комплексні діаграми спрямованості (ДС) передавальної і приймальної антен відповідно.

Аналіз цієї компоненти наведено в [1], де зокрема показано, що для сильно викривлених поверхонь слід використовувати спеціальні адаптивні алгоритми [12], що враховують характер поведінки функції поверхневих

джерел збудження в околиці елементарного осередку інтегрування.

На рис. 2 наведені діаграми зворотного розсіювання компоненти розсіювання на поверхні малопомітного літака В2, отримані методом математичного моделювання на довжині хвилі 3,2 см, і лінійної вертикальної поляризації для двох значень кутів підходу до мети. Тут ДЗР, позначене цифрою 1, відповідає підходу $+15^\circ$, а 2 – куту -15° .

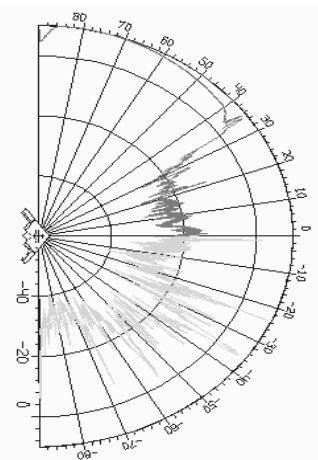


Рис. 2. Діаграма зворотного розсіювання компоненти розсіювання на гладкій поверхні малопомітного літака В2:

$b = 15^\circ$ при $a = 0^\circ \dots 90^\circ$, $b = -15^\circ$, $a = 0^\circ \dots 90^\circ$

Другий компонент поля, як видно з (4-5), відповідає вкладу від ребер об'єкта:

$$\vec{A}_2 = f_2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M \int_{l_{jk}} \vec{F}_{2k}(\vec{J}_{jk}^l, \vec{R}_l, f_1, \epsilon, \mu, \vec{r}_k, G_l) dl, \quad (11)$$

де функціонал \vec{F}_{2k} є наслідком інтерференції крайових хвиль пов'язаних елементів, що утворюють ребро l_{jk} . Аналіз показав, що вплив цієї компоненти у формування загального поля розсіювання малопомітного літака В2 склав менше 0,5%.

Третя компонента відповідає розсіюванню на двограних увігнутих структурах.

$$\vec{A}_3 = f_2 \cdot \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1}^M \int_{S_{jk}^+} \vec{F}_{3jk}(\vec{J}_{jk}^g, \vec{R}_g, f_1, \epsilon, \mu, \vec{r}_{jk}, G_g) dS. \quad (12)$$

Тут S_{jk}^+ – частина поверхні S_{j^+} , яка збуджується від індукційних струмів поверхні S_{k^+} .

Аналіз цієї компоненти наведено також в [13]. На рис. 3 наведені діаграми зворотного розсіювання компоненти, обумовленої дворазовою взаємодією елементів конструкції планера В2, отримані методом математичного моделювання на довжині хвилі 3,2 см, і лінійної вертикальної поляризації для кута місця 15° . При локації об'єкта В2 знизу при $\beta = -15^\circ$ в загальному полі розсіювання ця компонента практично відсутня.

Четверта компонента поля відповідає векторній сумі характеристик (8)

$$\vec{A}_4 = \sum_{t=1}^T \vec{A}_t, \quad (13)$$

кожна з яких визначається або за допомогою моделювання, або іншим альтернативним методом [13].

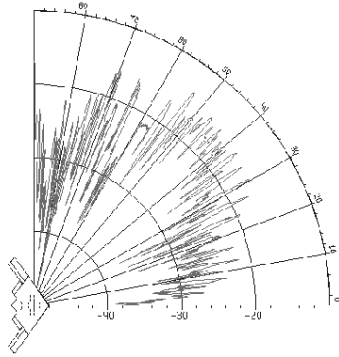


Рис. 3. ДЗР компоненти від дворових взаємодій елементів В2 для $b = 15^\circ$

Аналіз наведених на рис. 1 – 3 діаграм, без урахування четвертої компоненти, показав, що всі вони мають суттєво осцилюючий характер при значному динамічному діапазоні змін ефективної площі розсіювання.

Таким чином, ґрунтуючись на принципах методу фізичної теорії дифракції (методу струмів), вдається отримати рішення дифракційної задачі у вигляді суми компонент, обумовлених різними дифракційними явищами. Спільною особливістю цих компонент (10 – 13) в квазіоптичному діапазоні довжин хвиль є їх адитивна форма представлення. При цьому кожен член суми є інтегралом від коливальних джерел, розподілених на фінітних поверхнях довільної просторової конфігурації.

Отже, актуальним стає завдання обчислення (оцінки) цих інтегралів із запропонованою точністю з мінімальними обчислювальними витратами. Саме розробка та алгоритмічна реалізація обчислювальних процедур оцінки компонентів розсіювання дифракційних полів є основною науковою і практичною задачею.

ВИСНОВКИ

Математичне моделювання радіолокаційних полів розсіювання квазіоптичного діапазону на цілях складної просторової конфігурації раціонально проводити на базі методу фізичної теорії дифракції, оскільки всі відомі математичні моделі таких цілей є або спрощенням, або наслідком даного методу.

Уявлення про характер поверхні розсіювання реальної цілі дозволяє отримати вираз для компонент поля розсіювання у вигляді векторної суми інтегральних членів, кожен з яких представляє собою інтеграл від функції поверхневих джерел збудження по регулярній або спеціально виділеній області на поверхні моделі.

Енергетичні характеристики поля розсіювання істотно залежать від умов поляризаційної взаємодії цілі, передавача і приймача.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Атаманюк В. В. Моделювання полів розсіювання розподілених радіолокаційних об'єктів і сцен. *Наук. вісн. НЛТУ України*. 2015. Вип. 25.8. С. 299–306.
2. Борзов А. Б. Анализ вкладов отдельных элементов объекта сложной формы в общем поле рассеяния

коротких радиоволн методом цифрового моделирования. *Вопросы защиты информации*. 1995. Вып. 3(30). С. 20–22.

3. Борзов А. Б. Методика математического моделирования радиолокационных характеристик объектов сложной формы в квазиоптическом диапазоне радиоволн. *Вопросы защиты информации*. 1995. Вып. 3(30). С. 18–20.
4. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн: пер. с англ. М. Л. Левина. М.: Мир. 1978. Т. 1. 555 с., Т. 2. 557 с.
5. Штагер Е. А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь. 1986. 184 с.
6. Нотт Ю. Ф., Сеньор Т. Б. Сравнение трех методов, применяемых в высокочастотной теории дифракции. *ТИИЭР*. 1974. Т. 62. № 11. С. 63–71.
7. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн. М.: МГУ. 1968. 320 с.
8. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука. 1972. 424 с.
9. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. *Техническая электродинамика*. М.: Радио и связь. 2000. 536 с.
10. Борзов А. Б., Лабунец Л. В., Решетко А. Д. Кубатурная формула Филона вычисления осциллирующих интегралов. *Электронное моделирование*. 1989. Т. 11. № 2. С. 102–104.
11. Борзов А. Б. Машинне моделювання розсіювання радіохвиль на двограних увігнутих структурах аеродинамічних цілей. *Проектування і виробництво систем ракетного та артилерійського озброєння: тези доповідей 23-ої конф. КНУ*. 2000. С. 34.
12. Борзов А. Б. Итерационные методы в задачах рассеяния коротких волн на объектах сложной просторової конфігурації. *Інженерно-фізичні проблеми нової техніки: тези доповідей*. 2000. С. 23–24.
13. Тихонов В. В. *Статистическая радиотехника*. М.: Радио и связь. 1982. 624 с.

REFERENCES

1. Atamaniuk, V. V. (2015), "Modeliuvannia poliv rozsiuvannia rozpodilenykh radiolokatsiinykh obektiv i scen" [Modeling the scattering fields of distributed radar objects and scenes], *Naukovyi visn. NLTU of Ukraine*, No. 25.8, pp. 299–306.
2. Borzov, A. B. (1995), "Analyz vkladov otdelnykh elementov obekta slozhnoi formy v obshchem pole rasseianyia korotkykh radyovoln metodom tsyvrovoho modelyrovanyia [Analysis of the contributions of individual elements of a complex object in the general scattering field of short radio waves by digital simulation], *Information security*, No. 3(30). Pp. 20–22.
3. Borzov, A. B. (1995), "Metodyka matematycheskoho modelyrovanyia radyolokatsyonnykh kharakterystyk obektov slozhnoi formy v kvazyopticheskom diapazone radyovoln" [Methods of mathematical modeling of the radar characteristics of complex objects

- in the quasi-optical range of radio waves], *Information security*, No. 3(30). Pp. 18–20.
4. Felsen, L. & Markuvicz, N. (1978), “*Izluchenie i rasseyaniye voln: transl. angl. M. L. Levina*” [Radiation and scattering waves], Mir. M. Vol. 1. 555 p., Vol. 2. 557 p.
 5. Shtager, E. A. (1986) “Rasseyaniye radiovoln na telakh slozhnoi formy” [Scattering of radio waves by bodies of complex shape], *Radio and communications*. M. 184 p.
 6. Nott, Y. F. & Senior, T. B. (1974), “Sravnenie trekh metodov, primenyaemykh v vysokochastotnoi teorii difraktsii” [Comparison of three methods used in the high-frequency theory of diffraction], *TIIEER*. Vol. 62. No. 11. Pp. 63–71.
 7. Semenov, A. A. (1968) “*Teoriia elektromagnitnykh voln*” [Theory of electromagnetic waves], Moscow State Univ. 320 p.
 8. Bass, F. G. & Fuchs, I. M. (1972), “Rasseyaniye voln na statisticheski nerovnoi poverkhnosti” [Wave scattering on a statistically uneven surface], *Nauka*. M. 424 p.
 9. Pimenov, Y. V., Wolman, V. I. & Muravtsov, A. D. (2000), “*Tekhnicheskaya elektrodinamika*” [Technical electrodynamics], *Radio and Communications*. M. 536 p.
 10. Borzov, A. B., Labunecz, L. V. & Reshetko A. D. (1989), “Kubaturaya formula Filona vychisleniia osczilliruyushhikh integralov” [Cubature Formula Filon for Computing Oscillating Integrals], *Electronic Modeling*. Vol.11. № 2. Pp. 102–104.
 11. Borzov, A. B. (2000), “Machine modeling of scattering of radio waves on two-sided concave structures of aerodynamic targets” [Mashynne modeliuvannia rozsiuvannia radiokhvyl na dvohrannykh uvihnutykh strukturakh aerodynamichnykh tsilei], *Design and production of rocket and artillery systems: Abstracts of the 23^d conf. of KNU*. P. 34.
 12. Borzov, A. B. (2000), “Iteratsiini metody v zadakhakh rozsiuvannia korotkykh khvyl na ob'ektakh skladnoi prostorovoi konfigratsii” [Iterative methods in short-wave scattering problems on objects of complex spatial configuration], *Engineering-physical problems of new technology: Abstracts*. Pp. 23–24.
 13. Tikhonov, V. B. (1982), “*Statisticheskaya radiotekhnika*” [Statistical Radio Engineering], *Radio and communications*. M. 624 p.

Bubenshchykov R., Maystrenko O., Yunda V., Stetsiv S., Davydovskiy L.

SCATTERING OF RADIO WAVES ON BODIES OF COMPLEX SHAPE

The paper deals with the propagation of electromagnetic waves in space and their scattering at objects of location of complex electrophysical structure and spatial configuration of natural and anthropogenic character, based on wide-spread use and development of the most effective modern asymptotic methods of electrodynamics, development and

use of modern computational methods. Based on the principles of the method of physical theory of diffraction, the probable characteristics of the scattered field are determined. It is possible to obtain the solution of the diffraction problem in the form of the sum of components caused by different diffraction phenomena. A common feature of these components in the quasi-optical wavelength range is their additive form of representation. In this case, each term of the sum is an integral of the oscillatory sources distributed on the finite surfaces of an arbitrary spatial configuration.

The complexity of the spatial configuration of the targets causes the use of numerical methods as the basis for constructing a calculated methodology for evaluating radar scattering fields. Thus, the task of calculating (estimating) the integrals from oscillating sources distributed on finite surfaces of arbitrary spatial configuration with the proposed accuracy with minimal computational cost becomes relevant. It is the development and algorithmic implementation of computational procedures for the estimation of diffraction components of diffraction fields that is the main scientific and practical task.

Mathematical modeling of radar scattering fields of the quasi-optical range for the purposes of complex spatial configuration is rational to be performed on the basis of the method of physical theory of diffraction, since all known mathematical models of such goals are either a simplification or a consequence of this method.

The idea of the nature of the scattering surface of a real target allows to obtain the expression of the components of the scattering field in the form of a vector sum of integral terms, each of which is an integral of the function of surface excitation sources on a regular or specially selected region on the surface of the model.

The energy characteristics of the scattering field depend significantly on the conditions of polarization interaction of the target, the transmitter and the receiver.

Keywords: radar, electromagnetic radiation, object of location, scattering of electromagnetic waves, object of scattering, backscatter diagram.

Відомості про авторів:

Бубеншиков Роман Володимирович
старший викладач кафедри ракетних військ
факультету ракетних військ і артилерії
Національної академії сухопутних військ імені гетьмана
Петра Сагайдачного
м. Львів, Україна
e-mail: flokee007@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6610-0360>

Information about the authors:

Roman Bubenshchykov
Senior Instructor of Department of Missile Forces of Faculty
of Missile Forces and Artillery of Hetman Petro Sahaidachnyi
National Army Academy
Lviv, Ukraine
e-mail: flokee007@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6610-0360>

Юнда Валерій Анатолійович

кандидат технічних наук, старший викладач кафедри ракетно-артилерійського озброєння факультету ракетних військ і артилерії Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
e-mail: Valera.Yunda@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-8941-823X>

Valerii Yunda

Candidate of Technical Sciences
Senior Instructor of Department of the Rocket-artillery Armament Department of Faculty of Missile Forces and Artillery of Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
Lviv, Ukraine
e-mail: Valera.Yunda@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-8941-823X>

Майстренко Олександр Васильович

доктор військових наук, начальник кафедри ракетних військ факультету ракетних військ і артилерії Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
e-mail: maj_Alex@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-9900-5930>

Olexandr Maystrenko

Doctor of Military Sciences
Head of Department of Missile Forces of Faculty of Missile Forces and Artillery of Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
Lviv, Ukraine
e-mail: maj_Alex@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-9900-5930>

Стеців Станіслав Васильович

кандидат технічних наук, викладач кафедри ракетних військ факультету ракетних військ і артилерії Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
e-mail: stanislav13@meta.ua
<https://orcid.org/0000-0003-1835-9874>

Stanislav Stetsiv

Candidate of Technical Sciences
Instructor of the Department of Missile Forces of Faculty of Missile Forces and Artillery of Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy
Lviv, Ukraine
e-mail: stanislav13@meta.ua
<https://orcid.org/0000-0003-1835-9874>

Давидовський Леонід Сергійович

кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник науково-дослідного відділу розвитку озброєння та військової техніки Сил спеціальних операцій Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України
e-mail: davidovskiy14@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-2529-1989>

Leonid Davydovskiy

Senior Research Associate of Research Department of Protection and Survivability Development of Central Scientific Research Institute of weapons and military equipment of the Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
e-mail: davidovskiy14@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-2529-1989>

Стаття надійшла до редколегії 03.04.2020.