

С. А. ГОРЕЛИШЕВ, Г. С. ЗАЛЕВСЬКИЙ

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВІДГУКУ КОМБІНОВАНОГО ОБ'ЄКТА З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ПІДСТИЛАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ

Характеристики вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів різних типів є найважливішою складовою, що зумовлює вибір зондувального та формування відбитого радіолокаційних сигналів. Більшість об'єктів різних класів (повітряних, наземних) у своєму складі мають металеві і діелектричні елементи конструкцій та резонансні розміри. Крім того, локація низьколітаючих повітряних об'єктів, а особливо наземних об'єктів, спостерігається на фоні потужного відбиття сигналу від підстилаючої поверхні. У статті запропонований ітераційний метод розрахунку електромагнітного відгуку резонансних комбінованих об'єктів з урахуванням взаємодії металевих та діелектричних внутрішніх компонентів та з урахуванням впливу підстилаючої поверхні. Отриманий метод базується на розв'язанні інтегральних рівнянь магнітного поля для металевого компонента та системи інтегральних рівнянь типу Мюллера для діелектричного компонента. У процесі ітерацій для отримання електромагнітного поля враховується процес переопромінювання компонент та наведення на їх поверхнях додаткових поверхневих струмів. Крім того, вирази для компонентів полів плоскої хвилі, електричного та магнітного диполів в присутності межі поділу простору представляються у вигляді двох складових, що відповідають первинному та вторинному полю, зумовленому впливом межі поділу. Отримання асимптотичних формул для компонентів поля диполя, що відбите межею поділу, ґрунтуються на введенні додаткового диполя, розташованого дзеркально основному щодо межі поділу. Розроблений алгоритм розрахунку електромагнітного відгуку комбінованого об'єкта, який спостерігається на тлі підстилаючої поверхні. За допомогою даного методу проведено математичне моделювання характеристик вторинного випромінювання комбінованої моделі типової повітряної ракети «повітря-поверхня» на частоті $f = 180$ МГц. Отримано діаграми зворотного вторинного випромінювання даного радіолокаційного об'єкта.

Ключові слова: комбінований об'єкт, резонансний розмір, електромагнітна взаємодія, підстилаюча поверхня, ефективна поверхня розсіювання

S. HORIELYSHEV, G. ZALEVSKY

METHOD FOR CALCULATING THE ELECTROMAGNETIC RESPONSE OF A COMBINED OBJECT TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE UNDERLYING SURFACE

The characteristics of secondary radiation from radar objects of different types are a key factor that determines the choice of probing and the formation of reflected radar signals. Most objects of various classes (airborne, ground-based) contain metal and dielectric elements in their structure and have resonant sizes. In addition, the detection of low-flying airborne objects, and especially ground-based objects, occurs against the background of powerful signal reflection from the underlying surface. The paper proposes an iterative method for calculating the electromagnetic response of resonant combined objects, taking into account the interaction of metal and dielectric internal components, as well as the influence of the underlying surface. The obtained method is based on solving integral equations for the magnetic field of the metal component and a system of integral equations of the Muller type for the dielectric component. During the iterations, the process of re-radiation of components and the induction of additional surface currents on their surfaces is considered in order to obtain the electromagnetic field. Furthermore, expressions for the components of plane wave fields and electric and magnetic dipoles in the presence of a boundary of the space division are presented as two components, corresponding to the primary and secondary fields caused by the influence of the boundary. The derivation of asymptotic formulas for the components of the field of a dipole reflected by the boundary is based on introducing an additional dipole, located symmetrically to the primary one relative to the boundary. A developed algorithm for calculating the electromagnetic response of a combined object, observed against the background of the underlying surface, is presented. Using this method, mathematical modeling of the secondary radiation characteristics of a combined model of a typical air-to-surface missile at a frequency of $f = 180$ MHz was carried out. Diagrams of the backscattered secondary radiation of this radar object were obtained.

Keywords: combined object, resonant size, electromagnetic interaction, metallic component, dielectric component, radar cross section

Вступ. Постановка проблеми. Досвід сучасної війни в Україні показав постійно зростаючу різноманітність об'єктів локації, підвищення їх можливостей [1, 2]. Це призводить до посилення вимог до точнісних характеристик радіолокаційних станцій (РЛС) і розширення складу видобутої радіолокаційної інформації [3].

Вирішення цієї задачі можливе за рахунок створення нових РЛС, що задовольняють сучасним вимогам, модернізації існуючих засобів, об'єднання різноманітних засобів у єдину систему, що забезпечує отримання радіолокаційної інформації про цілі в заданому секторі простору в реальному масштабі часу [4–6].

Більшість об'єктів різних класів (повітряних, наземних) у своєму складі мають металеві і діелектричні елементи конструкцій тобто є комбінованими об'єктами. Якщо розміри цих об'єктів порівнянні з довжинами хвиль, то необхідно враховувати резонансні ефекти. Крім того, локація низьколітаючих повітряних об'єктів, а особливо наземних об'єктів, має ряд особливостей. Відбитий такими радіолокаційними об'єктами (РЛО) сигнал спостерігається на фоні потужного відбиття від

підстилаючої поверхні [7].

З огляду на зазначене, виникає необхідність проведення досліджень, які спрямовані на розвиток технологій, що передбачають використання особливостей вторинного випромінювання повітряних та наземних об'єктів резонансних розмірів на тлі підстилаючої поверхні. Отримані результати дозволяють якісніше виділяти корисний сигнал від таких об'єктів на тлі перешкод від підстилаючої поверхні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Характеристики вторинного випромінювання (ХВВ) РЛО різних типів є найважливішою складовою, що зумовлює вибір зондувального та формування відбитого радіолокаційних сигналів [4–6]. Числові ХВВ повітряних та наземних об'єктів можуть бути отримані шляхом проведення фізичних експериментів [8–11] або за допомогою математичного моделювання [4, 12–16].

При проведенні математичного моделювання для об'єктів резонансних розмірів застосовуються методи, які засновані на розв'язанні поверхневих інтегральних рівнянь (ІР) [17–20]. Однак у цих роботах недостатньо уваги приділено комплексному

підходу до обліку взаємодії між металевими та діелектричними компонентами структури та впливу підстилаючої поверхні.

У праці [21] запропоновано шляхом використання ітераційного алгоритму розрахувати ХВВ комбінованих об'єктів. Але у цій праці розглядаються об'єкти, що мають тільки металеві конструктивні елементи різних електричних розмірів, які розташовані поруч у вільному просторі.

У роботах [22–24] отримані основні математичні співвідношення окремо для розрахунку ХВВ РЛО з металевою (ідеально-провідною (ІП)) поверхнею, що спостерігаються на тлі підстилаючої поверхні, а в роботах [25–27] – для діелектричних об'єктів, що знаходяться або поблизу або всередині підстилаючої поверхні.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що питання отримання апріорної інформації комбінованого об'єкту, який знаходиться на (поблизу) підстилаючої поверхні потребує подальшого дослідження.

Метою статті є розроблення електро-динамічного методу розрахунку характеристик розсіювання комбінованого об'єкта з урахуванням впливу підстилаючої поверхні.

Для цього необхідно вирішити такі задачі:

– розробити ітераційний метод розрахунку характеристик розсіювання комбінованого об'єкта з урахуванням впливу підстилаючої поверхні;

– розробити алгоритм ітераційного методу розрахунку характеристик розсіювання комбінованого об'єкта з урахуванням впливу підстилаючої поверхні;

– провести математичне моделювання характеристик вторинного випромінювання типової моделі комбінованого об'єкта, який знаходиться поблизу підстилаючої поверхні.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення мети дослідження розглянемо процес падіння плоскої електромагнітної хвилі (ЕМХ) на комбінований розсіювач резонансних розмірів, який знаходиться поблизу підстилаючої поверхні (рис. 1).

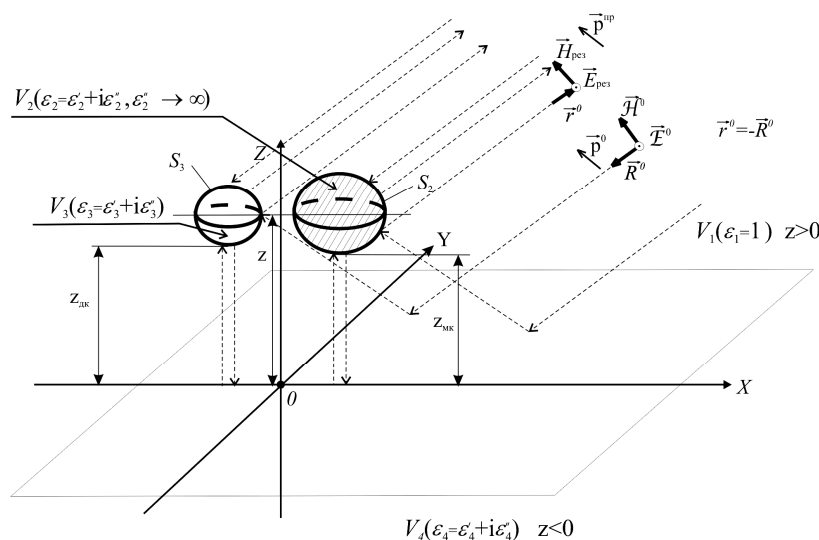


Рисунок 1 – Розташування комбінованого об'єкту поблизу з межею поділу діелектричних середовищ

Як межа поділу розглядається площина ($z=0$), що розділяє вільний простір V_1 і діелектричний дисперсійний простір із загасанням V_4 (зокрема межа поділу «повітря – ґрунт»). Верхньому вільному простору V_1 відповідає відносна діелектрична проникність $\epsilon_1=1$. Комбінований об'єкт, який складається з ІП компоненти V_2 з межею у вигляді поверхні S_2 та діелектричної компоненти V_3 з межею у вигляді поверхні S_3 , перебувати у верхньому вільному просторі V_1 .

Області V_3 та V_4 вважаються однорідними, ізотропними та характеризуються комплексними відносними діелектричними проникностями відповідно $\epsilon_\alpha(\lambda)=\epsilon'_\alpha(\lambda)+i\epsilon''_\alpha(\lambda)$, де $\alpha=3,4$. Для усіх просторів відносна магнітна проникність $\mu=1$. Для ІП компоненти мнма частина діелектричної

проникності складає $\epsilon''_2 \rightarrow \infty$. Центр комбінованого об'єкта розташовується у точці з координати $\{0, 0, z\}$.

Первинне електромагнітне поле (ЕМП) збуджено стороннім джерелом та задається як $(\vec{E}^0, \vec{H}^0)$, яке падає у напрямку $\vec{R}^0$. Для позначення полів допоміжних точкових електричного диполя (ЕД) та магнітного диполя (МД) у присутності межі поділу діелектричного простору V_4 використовуються позначення $(\vec{E}_\alpha^{e(m)}, \vec{H}_\alpha^{e(m)})$.

ЕМП, розсіяне комбінованим об'єктом з урахуванням взаємодії з межею поділу діелектричних середовищ позначається $(\vec{E}_{рез}, \vec{H}_{рез})$.

На рис. 1 штриховими лініями схематично показано електромагнітну взаємодію поля опромінення, комбінованого об'єкта з межею поділу.

Передавальна та приймальна антенні системи розташовуються в точках $\vec{Q}_{зонд}$ і $\vec{Q}_{np}$ відповідно та можуть бути як у дальній, так і в ближній зоні щодо комбінованого об'єкта.

Для розрахунку ЕМП, розсіяного комбінованим об'єктом з урахуванням впливу межі поділу діелектричних середовищ, застосуємо ітераційний алгоритм розрахунку ХВВ комбінованих об'єктів в однорідному просторі, якій враховує електромагнітну взаємодію внутрішніх компонент. Але необхідно враховувати наступні особливості:

– вирази для компонентів ЕМП плоскої хвилі в присутності межі поділу простору V_1 і діелектричного простору V_4 отримані при накладенні граничних умов на їх тангенціальні компоненти з урахуванням поляризації ($z > 0$) [7].

$$\vec{E}^0(\vec{Q}|\vec{R}^{01}, \vec{p}^0) = \vec{E}^{0перв}(\vec{Q}|\vec{R}^{01}, \vec{p}^0) + \vec{E}^{0втор}(\vec{Q}|\vec{R}^{02}, \vec{p}^0), (1)$$

$$\vec{H}^0(\vec{Q}|\vec{R}^{01}, \vec{p}^0) = \vec{H}^{0перв}(\vec{Q}|\vec{R}^{01}, \vec{p}^0) + \vec{H}^{0втор}(\vec{Q}|\vec{R}^{02}, \vec{p}^0), (2)$$

де $(\vec{E}^{0перв}, \vec{H}^{0перв})$ – первинна (падаюча) хвиля;

$(\vec{E}^{0втор}, \vec{H}^{0втор})$ – вторинна (відбита від межі поділу) хвиля;

$\vec{R}^{01} = (\vec{R}_x^{01}, \vec{R}_y^{01}, \vec{R}_z^{01})^T$, $\vec{R}^{02} = (\vec{R}_x^{01}, \vec{R}_y^{01}, -\vec{R}_z^{01})^T$ – одиничні вектори, що вказують напрями поширення первинної та відбитої хвиль відповідно;

$\vec{p}^0$ – одиничний вектор, що визначає поляризацію ЕМХ;

$\vec{Q} = \{x, y, z\}$ – точка, у якій спостерігається поле плоскої хвилі;

– для математичного опису полів ЕД та МД у разі наявності межі поділу простору V_1 і V_4 будемо використовувати вектор Герца [26, 28], який у однорідному просторі подається в наступному вигляді:

$$\text{для ЕД: } \vec{P}_\alpha^e(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = \vec{p}^0 (\varepsilon_0 \varepsilon_\alpha)^{-1} G_\alpha(\vec{Q}_0, \vec{Q}), (3)$$

$$\text{для МД: } \vec{P}_\alpha^m(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = \vec{p}^0 \mu_0^{-1} G_\alpha(\vec{Q}_0, \vec{Q}), (4)$$

де $\vec{Q}_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ – точка розташування диполя у просторі;

$$G_\alpha(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = \frac{\exp(i k_\alpha R)}{4\pi R}, R = |\vec{R}| = |\vec{Q} - \vec{Q}_0|,$$

$k_\alpha = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_\alpha \mu_0} = 2\pi/\lambda_\alpha$ – хвилеве число у середовищі V_α з ε_α .

λ_α – довжина хвилі у середовищі V_α ;

$\varepsilon_0 = (36\pi)^{-1} \times 10^{-9}$ Ф/м, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – абсолютні діелектрична та магнітна проникності вільного простору.

Таким чином, компоненти поля ЕД та МД при $\vec{Q}_0, \vec{Q} \in V_1$ ($z_0, z > 0$) зручно подати в наступному вигляді [28, 29]:

$$\vec{E}_\alpha^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^e) = k_\alpha^2 \vec{P}_\alpha^e(\vec{Q}_0, \vec{Q}) + \text{graddiv } \vec{P}_\alpha^e(\vec{Q}_0, \vec{Q}), (5)$$

$$\vec{H}_\alpha^e(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^e) = -i \omega \varepsilon_0 \varepsilon_\alpha \text{rot } \vec{P}_\alpha^e(\vec{Q}_0, \vec{Q}), (6)$$

$$\vec{E}_\alpha^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^m) = i \omega \mu_0 \text{rot } \vec{P}_\alpha^m(\vec{Q}_0, \vec{Q}); (7)$$

$$\vec{H}_\alpha^m(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^m) = k_\alpha^2 \vec{P}_\alpha^m(\vec{Q}_0, \vec{Q}) + \text{graddiv } \vec{P}_\alpha^m(\vec{Q}_0, \vec{Q}). (8)$$

Якщо диполь знаходиться над межею поділу двох діелектричних просторів, то для виконання граничних умов при $z = 0$ функція $G_\alpha(\vec{Q}_0, \vec{Q})$, що входить у вирази (3) і (4) для векторів Герца, подається у вигляді суперпозиції власних функцій рівняння Гельмгольца [26]:

$$G_\alpha(\vec{Q}_0, \vec{Q}) = \frac{1}{4\pi_0} \int_0^\infty F_\alpha(k) J_0(kr) \exp(-M_\alpha(k)|z - z_0|) dk, (9)$$

де $M_\alpha(k) = \sqrt{k^2 - k_\alpha^2}$,

$J_0(kr)$ – функція Бесселя 1-го роду нульового порядку,

$F_\alpha(k)$ – функція, що підлягає знаходженню.

При цьому якщо $\vec{Q}_0$ і $\vec{Q}$ знаходяться в одному просторі V_1 ($z_0, z > 0$), вектор Герца представляється у вигляді двох складових, що відповідають первинному $\vec{P}_\alpha^{e(m)перв}(\vec{Q}_0, \vec{Q})$ та вторинному $\vec{P}_\alpha^{e(m)втор}(\vec{Q}_0, \vec{Q})$ полю, зумовленому впливом межі поділу.

Отримання асимптотичних формул для компонентів ЕМП диполя, відбитого межею поділу, ґрунтуються на введенні додаткового диполя, розташованого дзеркально основному щодо межі поділу. У результаті ЕМП диполя над межею поділу є сумою первинного поля $\vec{E}_\alpha^{e(m)перв}$ і поля дзеркального диполя $\vec{E}_\alpha^{e(m)втор}$, помноженого на коефіцієнт відбиття з урахуванням поляризації [24]:

$$\begin{aligned} \vec{E}_\alpha^{e(m)}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0) &= \\ &= \vec{E}_\alpha^{e(m)перв}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0) + \vec{E}_\alpha^{e(m)втор}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0), \end{aligned} (10)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_\alpha^{e(m)}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0) &= \\ &= \vec{H}_\alpha^{e(m)перв}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0) + \vec{H}_\alpha^{e(m)втор}(\vec{Q}|\vec{Q}_0, \vec{p}^0), \end{aligned} (11)$$

Відповідно до ітераційного методу розрахунку ХВВ комбінованого об'єкта у вільному просторі для нульової ітерації розсіяння плоскої хвилі $(\vec{E}^0, \vec{H}^0)$ ІП елементами конструкції комбінованого об'єкта V_2 з поверхню S_2 при відсутності діелектричній компоненти V_3 з поверхню S_3 та умови що $\vec{Q}_{np} \in V_1$ отримаємо інтегральне подання [24]:

$$i\omega\vec{p}^0 \cdot (\vec{H}_2(\vec{Q}_{np}) - \vec{H}^0(\vec{Q}_{np})) = - \int_{S_2} (\vec{E}_1^{mпер}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0) + \vec{E}_1^{метор}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0)) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}_{s2}) ds_{Q_{s2}}, \quad (12)$$

де $\vec{H}^0(\vec{Q}_{np})$ – напруженість первинного магнітного поля, що враховує наявність межі поділу середовищ;

$\vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}_{s2})$ – щільність електричного струму в точці $\vec{Q}_{s2}$ на поверхні;

$\vec{H}_2(\vec{Q}_{np})$ – напруженість магнітного поля, розсіяного металевим компонентом.

Напруженість електричного поля $\vec{E}_2(\vec{Q}_{np})$ отримуємо як

$$i\omega\vec{p}^0 \cdot (\vec{E}_2(\vec{Q}_{np})) = \int_{S_2} \vec{H}_2^\perp(\vec{Q}_{s2}) (\vec{E}_1^{етпер}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0) + \vec{E}_1^{етметор}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0)) ds_{Q_{s2}}, \quad (13)$$

де $\vec{E}_1^{етпер}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0)$, $\vec{E}_1^{етметор}(\vec{Q}_{s2} | \vec{Q}_{np}, \vec{p}^0)$ – тангенціальна складова компонентів поля точкового ЕД у точці інтегрування $\vec{Q}_{s2}$ з векторним моментом $\vec{p}^0$ у вільному просторі V_1 .

Еквівалентні електричні $\vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}_{s2})$ струми у точках $Q_{s2} \in S_2$ на поверхні металеві компоненти комбінованого об'єкту з урахуванням ЕМ взаємодії з межею поділу середовищ знаходимо за допомогою формули [24]:

$$\begin{aligned} & (\vec{v}^0 \times \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}_{s2}) (1 + \Omega_{s0}(\vec{Q}_{s2})) + \\ & + \frac{2}{i\omega} \int_{S_2 \setminus s_0} \vec{E}_1^{mпер}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s2}, \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}) ds_Q + \\ & + \frac{2}{i\omega} \int_{S_2} \vec{E}_1^{метор}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s2}, \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}) ds_Q = \\ & = 2\vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_{s2}), \quad (\vec{Q}_{s2} \in S_2), \end{aligned} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}_{s3}) (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) + 2(i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{етпер}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}) \varepsilon_3 + \varepsilon_0^{-1} \vec{D}_{31}^{етпер}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^e(\vec{Q})] ds_Q + \\ & + 2(i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{етметор}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}) \varepsilon_3 + \varepsilon_0^{-1} \vec{D}_{31}^{етметор}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^e(\vec{Q})] ds_Q = -2\varepsilon_1 \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{E}^0(\vec{Q}_{s3}) \\ & - (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}_{s3}^e(\vec{Q}_{s3}) + (i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{mпер}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}) \varepsilon_3 + \vec{E}_{31}^{mпер}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^e(\vec{Q})] ds_Q + \\ & + (i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{mметор}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}) \varepsilon_3 + \vec{E}_{31}^{mметор}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^e(\vec{Q})] ds_Q = \vec{\tau}_q^0 \cdot \vec{H}^0(\vec{Q}_{s3}) \end{aligned} \right. \quad \vec{Q}_{s3} \in S_3. \quad (15)$$

де $\vec{H}_{31}^{етпер(метор)}(\vec{\tau}_q^0) = \vec{H}_3^{етпер(метор)}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s3}, \vec{\tau}_q^0) - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} \vec{H}_1^{етпер(метор)}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s3}, \vec{\tau}_q^0)$,

де $\vec{\tau}_q^0$, $q = 1, 2$ – дві дотичних орти у точці $\vec{Q}_{s2}$;

$\vec{v}^0$ – нормаль у точці на поверхні компоненту;

$$\Omega_{s0}(\vec{Q}_{s2}) \approx \frac{2}{i\omega} \int_{s_0} \vec{E}_1^{mпер}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s2}, \vec{\tau}_q^0) ds_Q -$$

параметр, який розраховується по ділянці s_0 точки

$\vec{Q}_{s2}$, яка має особливість.

Параметр $\Omega_{s0}(\vec{Q}_{s2})$ є значенням поверхневого інтеграла, що містить первинне поле МД, малої ділянки s_0 особливої точки Q_{s2} .

Одночасно розраховується ЕМП, яке розсіяне діелектричної компонентою V_3 з поверхню S_3 при відсутності металеві компоненти V_2 з поверхню S_2 комбінованого об'єкту, розташованого у верхньому на півпросторі V_1 (рис. 1). Для цього використовуються наступні ЕМП допоміжних точкових джерел:

$(\vec{E}_1^{e(m)}, \vec{H}_1^{e(m)})$ – ЕМП ЕД (МД), що враховує наявність межі поділу діелектричних просторів V_1 з параметрами вільного простору ε_1, k_1 і простору V_4 з параметрами ґрунту ε_4, k_4 ;

$(\vec{E}_3^{e(m)}, \vec{H}_3^{e(m)})$ – ЕМП ЕД (МД), що враховує наявність межі поділу діелектричних просторів V_1 та V_4 за умови, що V_1 відповідають параметри матеріалу діелектричної компоненти комбінованого об'єкту ε_3, k_3 і простору V_4 з параметрами ґрунту ε_4, k_4 .

Тоді при виконанні умові $z_0, z > 0$ формула розрахунку еквівалентних електричних $\vec{J}_{s3}^e(\vec{Q}_{s3})$ та магнітних $\vec{J}_{s3}^m(\vec{Q}_{s3})$ струми на поверхні діелектричної компоненти комбінованого об'єкту при наявності межі поділу середовищ має наступний вигляд [27]:

$$\begin{aligned}\bar{D}_{31}^{e \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0) &= \bar{D}_3^{e \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0) - \bar{D}_1^{e \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0), \\ \bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0) &= \bar{\mathcal{H}}_3^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0) - \bar{\mathcal{H}}_1^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0), \\ \bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0) &= \bar{\mathcal{E}}_3^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0) - \bar{\mathcal{E}}_1^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{Q}|\bar{Q}_{s3}, \bar{\tau}_q^0),\end{aligned}$$

Поверхневі інтеграли (15) обмежені в будь-якій точці поверхні S_3 . Величини $\bar{\mathcal{H}}_{31}^{e \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0)$, $\bar{D}_{31}^{e \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0)$, $\bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0)$, $\bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ перв(втор)}}(\bar{\tau}_q^0)$ – ядра системи (15) є різницею сингулярних функцій

ЕМП у просторах V_1 та V_3 .

Напруженості ЕМП, розсіяних діелектричною компонентою комбінованого об'єкта з урахуванням ЕМ взаємодії з межею поділу середовищ обчислюється згідно виразів (16), (17) [24, 27]:

$$\begin{aligned}i\omega\bar{p}^0 \cdot (\bar{D}_3(\bar{Q}_{np}) - \bar{D}^0(\bar{Q}_{np})) &= \int_{S_3} \left\{ \left(\bar{\mathcal{H}}_{31}^{e \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{H}}_{31}^{e \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^m(\bar{Q}_{s3}) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\bar{D}_{31}^{e \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) + \bar{D}_{31}^{e \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^e(\bar{Q}_{s3}) \right\} ds_{Q_{s3}},\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}-i\omega\bar{p}^0 \cdot (\bar{H}_3(\bar{Q}_{np}) - \bar{H}^0(\bar{Q}_{np})) &= \int_{S_3} \left\{ \left(\bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^m(\bar{Q}_{s3}) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{np}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^e(\bar{Q}_{s3}) \right\} ds_{Q_{s3}}.\end{aligned}\quad (17)$$

де $\bar{J}_{s3}^m(\bar{Q}_{s3}) = \bar{J}_{s3}^m(\bar{Q}_{s3})\epsilon_0\epsilon_2$.

Напруженості ЕМП, розсіяного всім комбінованим об'єктом без урахування взаємодії аналізованих металевих і діелектричних компонентів, але з урахуванням ЕМ взаємодії з межею поділу середовищ (нульова ітерація), $(\bar{E}_{рез}^0, \bar{H}_{рез}^0)$ розраховуються за допомогою наступних виразів (18) та (19).

$$\bar{p}^0 \cdot \bar{H}_{рез}^0(\bar{Q}_{np}) = \bar{p}^0 \cdot (\bar{H}_2^0(\bar{Q}_{np}) + \bar{H}_3^0(\bar{Q}_{np})), \quad (18)$$

$$\bar{p}^0 \cdot \bar{E}_{рез}^0(\bar{Q}_{np}) = \bar{p}^0 \cdot (\bar{E}_2^0(\bar{Q}_{np}) + \bar{E}_3^0(\bar{Q}_{np})). \quad (19)$$

$$\begin{aligned}-i\omega\bar{p}^0 \cdot (\bar{H}_3^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s2}) - \bar{H}^0(\bar{Q}_{s2})) &= \int_{S_3} \left\{ \left(\bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{s2}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{H}}_{31}^{m \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{s2}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^{m(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3}) + \right. \\ &\quad \left. + \left(\bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ перв}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{s2}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{E}}_{31}^{m \text{ втор}}(\bar{Q}_{s3}|\bar{Q}_{s2}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s3}^{e(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3}) \right\} ds_{Q_{s3}},\end{aligned}\quad (20)$$

де $\bar{\mathcal{H}}^0(\bar{Q}_{s2}) \equiv \bar{\mathcal{H}}^0(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{01}, \bar{p}^0) = \bar{\mathcal{H}}^{0 \text{ перв}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{01}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{H}}^{0 \text{ втор}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{02}, \bar{p}^0)$

Аналогічно у кожній точці поверхні S_3 діелектричної компоненти V_3 комбінованого об'єкта розраховуємо за допомогою $\bar{J}_{s2}^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s2})$

напруженість магнітного $\bar{H}_2^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3})$ та електричного $\bar{E}_2^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3})$ поля за формулою (21) та (22):

$$i\omega\bar{p}^0 \cdot (\bar{H}_2^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3}) - \bar{H}^0(\bar{Q}_{s3})) = - \int_{S_2} \left(\bar{\mathcal{E}}_1^{m \text{ перв}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{Q}_{s3}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{E}}_1^{m \text{ втор}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{Q}_{s3}, \bar{p}^0) \right) \cdot \bar{J}_{s2}^{e(\xi-1)}(\bar{Q}_{s2}) ds_{Q_{s2}}, \quad (21)$$

$$i\omega\bar{p}^0 \cdot (\bar{E}_2^{(\xi-1)}(\bar{Q}_{s3})) = \int_{S_2} \bar{H}_2^{(\xi-1)\perp}(\bar{Q}_{s3}) \left(\bar{\mathcal{E}}_1^{e \text{ перв}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{Q}_{s3}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{E}}_1^{e \text{ втор}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{Q}_{s3}, \bar{p}^0) \right) ds_{Q_{s2}}, \quad (22)$$

де $\bar{\mathcal{H}}^0(\bar{Q}_{s2}) \equiv \bar{\mathcal{H}}^0(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{01}, \bar{p}^0) = \bar{\mathcal{H}}^{0 \text{ перв}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{01}, \bar{p}^0) + \bar{\mathcal{H}}^{0 \text{ втор}}(\bar{Q}_{s2}|\bar{R}^{02}, \bar{p}^0)$.

На металевій компоненті комбінованого об'єкта знаходимо щільність струму $\vec{J}_{s2}^{e(\xi)}(\vec{Q}_{s2})$ при ξ -й ітерації в умовах, коли напруженість магнітного поля опромінення є сума напруженості магнітного поля, що опромінює металеву компоненту комбінованого об'єкта з урахуванням взаємодії з межею поділу просторів $\vec{H}^0(\vec{Q}_{s2})$ і напруженості магнітного поля, розсіяного діелектричної компонентою $\vec{H}_3^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s2})$ на $(\xi-1)$ -й ітерації, обчисленого за допомогою (20) в точках $\vec{Q}_{s2}$ у вигляді (23).

Паралельно шляхом розв'язання СІРМ, яке при ξ -й ітерації має вигляд (24), знаходиться щільність електричного $\vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q}_{s3})$ та магнітного $\vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}_{s3})$ струму на поверхні S_3 . При цьому у (24) у якості напруженості первинного ЕМП використовується сума відповідних складових первинного ЕМП опромінення діелектричної компоненти

$$\left\{ \begin{aligned} & (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}_{s3}) (\epsilon_1 + \epsilon_3) + 2(i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{e\text{ перс}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}) \epsilon_3 + \epsilon_0^{-1} \vec{D}_{31}^{e\text{ перс}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q})] ds_Q + \\ & + 2(i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{e\text{ втор}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}) \epsilon_3 + \epsilon_0^{-1} \vec{D}_{31}^{e\text{ втор}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q})] ds_Q = -2\epsilon_1 \vec{\tau}_q^0 \cdot (\vec{E}^0(\vec{Q}_{s3}) + \vec{E}_2^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s3})) \\ & - (\vec{\tau}_q^0 \times \vec{v}^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q}_{s3}) + (i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{m\text{ перс}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}) \epsilon_3 + \vec{E}_{31}^{m\text{ перс}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q})] ds_Q + \\ & + (i\omega)^{-1} \int_{S_3} [\vec{H}_{31}^{m\text{ втор}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{m(\xi)}(\vec{Q}) \epsilon_3 + \vec{E}_{31}^{m\text{ втор}}(\vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s3}^{e(\xi)}(\vec{Q})] ds_Q = \vec{\tau}_q^0 \cdot (\vec{H}^0(\vec{Q}_{s3}) + \vec{H}_2^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s3})) \end{aligned} \right. \quad \vec{Q}_{s3} \in S_3. \quad (24)$$

Далі за допомогою (12), (13) та (16), (17) можна знайти сумарне розсіяне поле всього комбінованого об'єкта при ξ -й ітерації відповідно до виразів (18) та (19).

Кількість ітерацій даної процедури залежить від збіжності поверхневих струмів на металевій V_2 та діелектричній V_3 компонентах для подальших ітерацій із заданою точністю δ або збіжності розсіяного ЕМП у дальній зоні. Звісно, що розрахунок ХВВ комбінованого об'єкта, що знаходиться поблизу межі поділу середовищ, буде більш тривалим у порівнянні з тим самим об'єктом у вільному просторі та кількість ітерацій зростає як мінімум у 1,5-2 рази.

Отримані основні математичні співвідношення для розрахунку ЕМП, розсіяного комбінованим об'єктом з урахуванням взаємодії його внутрішніх компонентів на тлі підстилаючої поверхні за структурою схожі з аналогічними ІР для комбінованих об'єктів в однорідному просторі [12]. Відмінність полягає в полях ЕД (МД), які використовуються як ядер рівнянь. Для об'єктів, які спостерігаються на тлі підстилаючої поверхні, в ІР використовуються поля диполів, які можуть бути представлені у вигляді суми первинного та вторинного полів. Поява вторинного поля ЕД (МД) обумовлена впливом межі поділу діелектричних

комбінованого об'єкта $(\vec{E}^0(\vec{Q}_{s3}), \vec{H}^0(\vec{Q}_{s3}))$ з урахуванням взаємодії з межею поділу просторів і ЕМП, розсіяного металевою компонентою об'єкта $(\vec{E}_2^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s3}), \vec{H}_2^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s3}))$, що знайдені згідно (21), (22), в точках $\vec{Q}_{s3}$.

$$\begin{aligned} & (\vec{v}^0 \times \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^{e(\xi)}(\vec{Q}_{s2}) (1 + \Omega_{s_0}(\vec{Q}_{s2})) + \\ & + \frac{2}{i\omega} \int_{S_2 \setminus S_0} \vec{E}_1^{m\text{ перс}}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s2}, \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}) ds_Q + \\ & + \frac{2}{i\omega} \int_{S_2} \vec{E}_1^{m\text{ втор}}(\vec{Q} | \vec{Q}_{s2}, \vec{\tau}_q^0) \cdot \vec{J}_{s2}^e(\vec{Q}) ds_Q = \\ & = 2\vec{\tau}_q^0 \cdot (\vec{H}^0(\vec{Q}_{s2}) + \vec{H}_3^{(\xi-1)}(\vec{Q}_{s2})), \quad (\vec{Q}_{s2} \in S_2); \end{aligned} \quad (23)$$

середовищ. Точне обчислення складових вторинного поля диполів, формули для яких містять інтеграли від комплекснозначних швидкоосцилюючих функцій (інтеграли Зоммерфельда) [28, 29], пов'язане зі значним збільшенням обчислень.

Тому у роботі [24] запропоновано метод розрахунку компонент полів диполів у присутності межі поділу діелектричних середовищ, що дозволяє суттєво скоротити час обчислень (час формування матриць застосовуваних ІР). Метод адаптований до відстані точки розташування диполя та точки спостереження його поля щодо межі поділу $R, |z_0|, |z|$. Метод розроблений на основі аналізу поведінки компонент первинного та вторинного поля диполів.

При невеликих значеннях величин $R, |z_0|, |z|$ [24] застосовується алгоритм чисельного інтегрування швидкоосцилюючих функцій. За допомогою обчислювального експерименту встановлено, що весь інтервал інтегрування по k (хвильове число у просторі V_1) розбивається на 2 частини. На невеликій ділянці від 0 до $5k_1$ (при $k = k_1$ спостерігається сплеск), інтегрування здійснюється за допомогою квадратурної формули Сімпсона у поєднанні з алгоритмом Ромберга (з адаптивним кроком інтегрування).

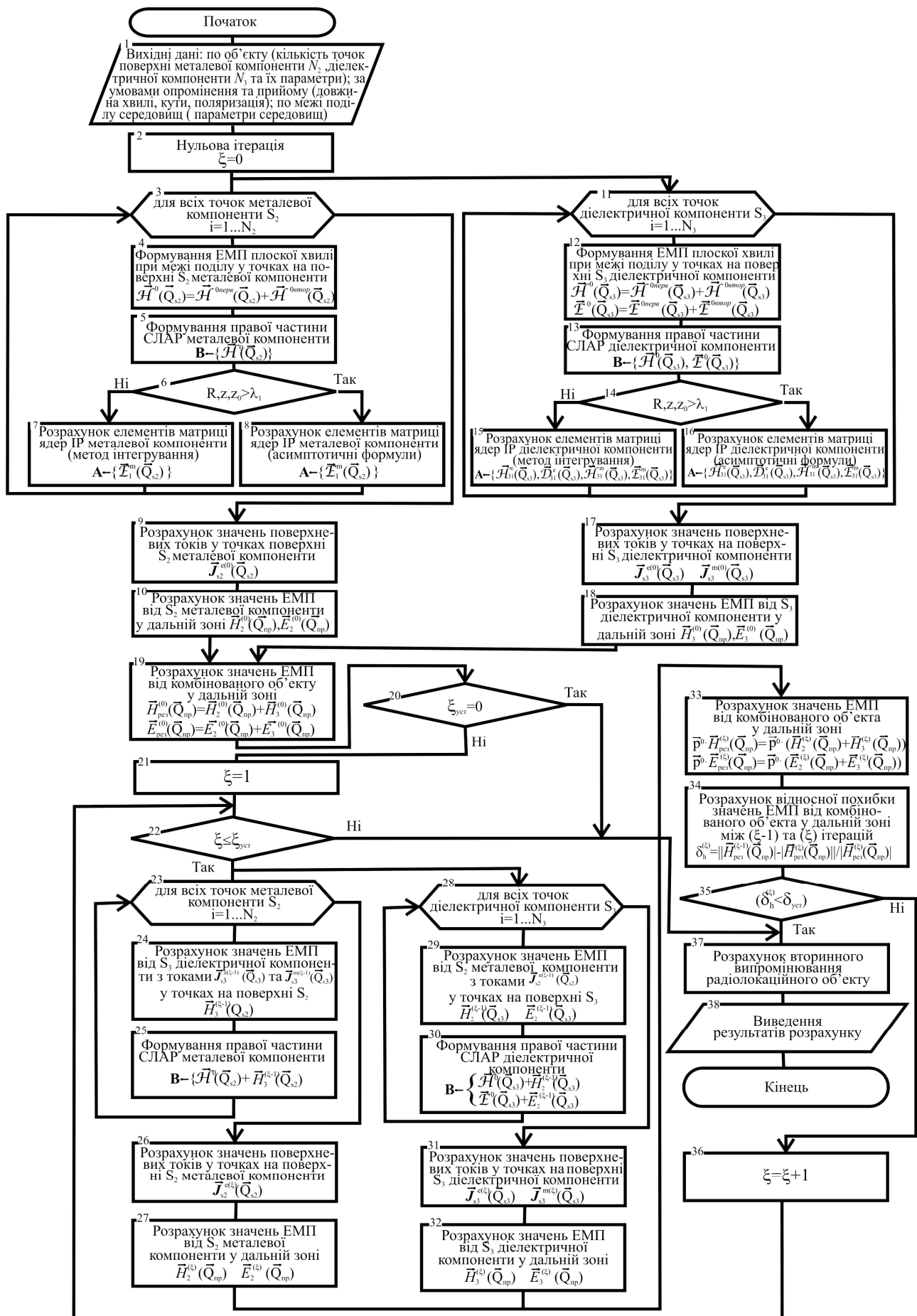


Рисунок 2 – Блок-схема розрахунку ЕМП, розсіяного комбінованим об'єктом у вигляді відокремлених металевих і діелектричних компонентів поблизу межі поділу діелектричних середовищ

На іншому інтервалі, де спостерігаються осциляції підінтегральної функції, застосовується вагова квадратурна формула.

При досить великих відстанях точок, що розглядаються, від межі поділу застосовуються прості асимптотичні формули

Тобто метод адаптований до відстаней від точки розташування диполя $|z_0|$ та точки спостереження $|z|$ його поля до межі поділу. Такий підхід дозволяє уникнути невиправданих часових витрат на обчислення складових ЕМП аналізованих диполів.

На основі вищевикладеного створено алгоритм чисельного розрахунку ХВВ повітряних низьковисотних та наземних комбінованих об'єктів резонансних розмірів (рис. 2). Розглянемо основні етапи запропонованого алгоритму та його особливості.

Вихідними даними алгоритму (блок 1) є:

- параметри розсіювачів (напівосі еліпсоїдів, що створюють поверхню металевих та діелектричних компонентів комбінованого об'єкту; кути, що визначають їхню орієнтацію; координати центрів еліпсоїдів; кількість точок сітки на поверхні металевих та діелектричних компонентів комбінованого об'єкту, електродинамічні параметри матеріалів);

- умови опромінення та прийому (сітка частот зондування; кути, що задають напрямки з точок опромінення та прийому на комбінований об'єкт; відстані від комбінованого об'єкту до цих точок; поляризація зондувальної ЕМХ);

- параметри підстилюючої поверхні (коефіцієнт відбиття та діелектрична проникність як функція частоти).

У блоках 4 та 12 при розрахунку ЕМП плоскої хвилі, яка опромінює поверхні металевих та діелектричних компонент, враховуються як первинна (падаюча) хвиля так і вторинна (відбита від межі поділу) хвиля.

Блоки 6–8 та 14–16 складають уніфікований алгоритм, адаптований до зміни величин $R, |z_0|, |z|$ та дозволяють обрати необхідний метод розрахунку полів ЕД та МД у присутності межі поділу діелектричних просторів.

При ітераційному розрахунку електромагнітного відгуку комбінованого об'єкту з урахуванням електромагнітної взаємодії з межею поділу діелектричних середовищ існують нульова ітерація (блоки 2–20) та ітерації вищого порядку (блоки 1–35), які дозволяють врахувати взаємодію між металевими та діелектричними компонентами комбінованого об'єкту.

За допомогою розробленого електродинамічний метод розрахунку електромагнітного поля, розсіяного комбінованим об'єктом з урахуванням електромагнітної взаємодії між ІІ і діелектричними елементами його конструкції та з межею поділу діелектричних середовищ проведено математичне моделювання ХВВ повітряних низьковисотних та наземних комбінованих об'єктів резонансних розмірів.

У якості прикладу отримані ХВВ комбінованої моделі типової повітряної ракети «повітря-поверхня» на частоті $f = 180$ МГц ($\lambda = 1,667$ м). Зовнішній вигляд комбінованої моделі наведений на рис. 3. Поверхня моделі була апроксимована за допомогою ділянок поверхонь 13 трохвісних еліпсоїдів.

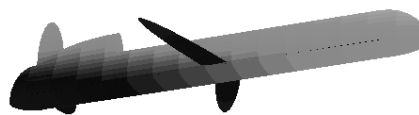


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд комбінованої моделі

На відміну від моделі у [24] крила моделювались 2 еліпсоїдами, як електрично тонка діелектрична оболонка, виготовлена з однорідного матеріалу з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_3 = 3,2 + i0,003$, що відповідає склопластику. Металева компонента це фюзеляж, турбіна, кіль та кермо висоти (11 еліпсоїдів).

Для порівняння результатів умови проведення розрахунків ХВВ були обрані аналогічними до роботи [24].

Як підстилююча поверхня (нижнього напівпростору V_4 , рис. 1) при моделюванні використовувалися сірий суглинок із діелектричною проникністю $\epsilon_3 = 6,887 + i3,325$. Для врахування випадкових змін ракурсу РЛО у вертикальній площині кожному фіксованому значенню β відповідав випадковий кут місця, розподілений за рівномірним законом у діапазоні $\theta = 87..97^\circ$.

На рис. 4 зображено діаграма зворотнього вторинного випромінювання (ДЗВВ) комбінованої моделі типової повітряної ракети при висоті польоту $z=50$ м над поверхнею землі (сіра лінія). На цьому ж графіку для порівняння наведено ДЗВВ комбінованої моделі без урахування відбиття від підстилюючої поверхні (чорна лінія).

При порівнянні результатів було отримано, що тенденції ДЗВВ, які виявлені для повністю металевих об'єктів [24], зберігаються і у разі комбінованого об'єкта. Також спостерігаються осциляції ЕПР, які пояснюються тим, що прямий сигнал опромінення і сигнал, відбитий поверхнею землі, біля поверхні РЛО складаються з різними фазами. Так само в точці прийому складаються прямий сигнал, відбитий РЛО, і сигнал, перевідбитий поверхнею. Тому при деяких кутах місця або азимуту спостерігаються досить суттєві зміни ЕПР і фактично завмирання сигналу. Однак значення ЕПР комбінованого об'єкта відрізняється на різних ракурсах від ЕПР повністю металевих об'єктів в межах від 3 до 10% як в більшу, так і в меншу сторону, що пояснюється взаємодією різнорідних компонентів. Такі відмінності в значеннях ЕПР пояснюються тим, що діелектричний компонент у структурі комбінованого об'єкта займає не більше 15% та його вплив менший

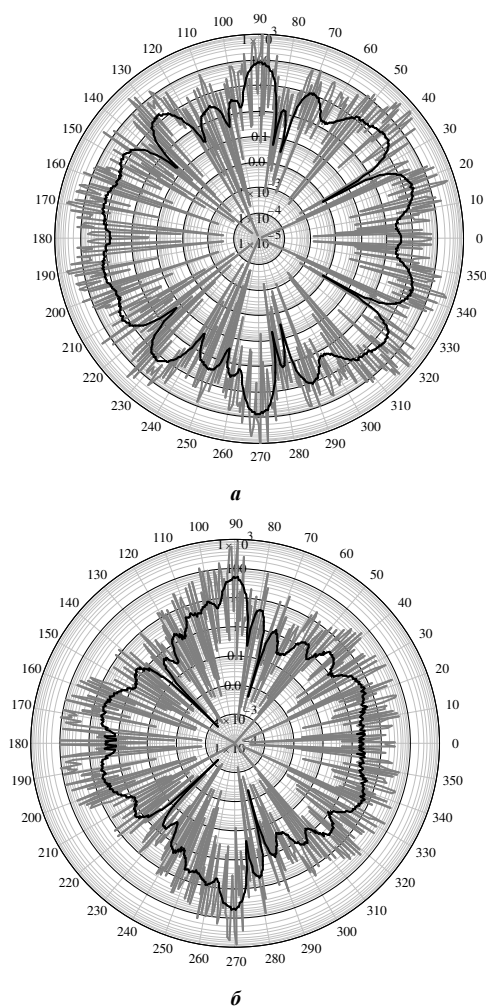


Рисунок 4 – ДЗВВ комбінованої моделі типової повітряної ракети на висоті 50 м над землею (сіра лінія) та у вільному просторі (чорна лінія), на горизонтальній (а) та вертикальній (б) поляризації

Висновки. Досвід сучасної війни в Україні показав, що більшість об'єктів (повітряних, наземних) у своєму складі мають металеві і діелектричні елементи конструкції резонансних розмірів. Крім того, відбитий сигнал від низьколітаючих повітряних об'єктів, а особливо наземних об'єктів, спостерігається на фоні потужного відбиття від підстилаючої поверхні.

1. У статті запропонований ітераційний метод розрахунку електромагнітного відгуку резонансних комбінованих об'єктів з урахуванням взаємодії металевих та діелектричних внутрішніх компонентів та з урахуванням впливу підстилаючої поверхні. Для розрахунку ЕМП, розсіяного комбінованим об'єктом з урахуванням впливу межі поділу діелектричних середовищ, застосований ітераційний метод розрахунку ХВВ комбінованих об'єктів в однорідному просторі, якій враховує електромагнітну взаємодію внутрішніх компонентів.

Отриманий метод базується на розв'язанні ІР магнітного поля для металевого компонента та системи ІР типу Мюллера для діелектричного компонента. У процесі ітерацій для отримання ЕМП враховується процес переопромінення компонент та наведення на їх поверхнях додаткових поверхневих

струмів. Крім того, вирази для компонентів полів плоскої хвилі, ЕД та МД в присутності межі поділу простору представляються у вигляді двох складових, що відповідають первинному та вторинному полю, зумовленому впливом межі поділу. Отримання асимптотичних формул для компонентів поля диполя, відбитого межею поділу, ґрунтуються на введенні додаткового диполя, розташованого дзеркально основному щодо межі поділу.

Розрахунок ХВВ комбінованого об'єкта, що знаходиться поблизу межі поділу середовищ, буде більш тривалим у порівнянні з тим самим об'єктом у вільному просторі та кількість ітерацій зростає як мінімум у 1,5-2 рази.

2. Розроблений алгоритм розрахунку електромагнітного відгуку комбінованого об'єкта, який спостерігається на тлі підстилаючої поверхні. Точне обчислення складових вторинного поля диполів, формули для яких містять інтеграли від комплекснозначних швидкоосцилюючих функцій (інтеграли Зоммерфельда), пов'язане зі значним збільшенням обчислень. Тому під час розробки алгоритму використано адаптований до відстані точки розташування диполя та точки спостереження його поля щодо межі поділу метод розрахунку компонент полів диполів у присутності межі поділу діелектричних середовищ. Це дозволяє суттєво скоротити час обчислень (час формування матриць застосовуваних ІР).

3. За допомогою розробленого електродинамічного методу розрахунку електромагнітного поля, розсіяного комбінованим об'єктом з урахуванням електромагнітної взаємодії між ІІ і діелектричними елементами його конструкції та з межею поділу діелектричних середовищ проведено математичне моделювання ХВВ повітряних низьковисотних та наземних комбінованих об'єктів резонансних розмірів.

У якості прикладу отримані ХВВ комбінованої моделі типової повітряної ракети «повітря-поверхня» на частоті $f = 180$ МГц на тлі підстилаючої поверхні (сірий суглинок). Отримано діаграми зворотного вторинного випромінювання даного радіолокаційного об'єкта.

Тенденції ДЗВВ, які виявлені для повністю металевих об'єктів, зберігаються і у разі комбінованого об'єкта. Спостерігаються осциляції ЕПР, які пояснюються тим, що прямий сигнал опромінення і сигнал, відбитий поверхнею землі, біля поверхні РЛО складаються з різними фазами. Однак значення ЕПР комбінованого об'єкта відрізняється на різних ракурсах від ЕПР металевих об'єктів в межах від 3 до 10% як в більшу, так і в меншу сторону, що пояснюється взаємодією різномірних компонентів.

Подальші дослідження в цьому напрямку доцільно спрямувати на створення сучасних повітряних та наземних комбінованих об'єктів та проведення математичного моделювання їх характеристик вторинного випромінювання.

Список літератури

1. Теорія прийняття рішень органами військового управління : монографія / В. І. Ткаченко, Є. Б. Смірнов, Г. А. Дробаха та ін. ; за ред. В. І. Ткаченка, Є. Б. Смірнова. ХУПС, 2008. 545 с.
2. Теоретичні основи побудови та застосування розвідувально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони : монографія / С. П. Ярош ; за ред. І. О. Кириченка. ХУПС, 2012. 512 с.
3. Романченко І. С., Загорка О. М., Бутенко С. Г., Дейнега О. В. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони). Полісся, 2011. 344 с.
4. Barton D. K. Radar System Analysis and Modeling. Norwood, USA. Artech House, Inc., 2005. 566 p.
5. Радиоэлектронные системы : Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. 2-е изд. Радиотехника, 2007. 512 с.
6. Radar Handbook / M. I. Skolnik ed. 3d ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 1348 p.
7. Ultrawideband Radar. Application and Design. J. D. Taylor ed. Boca Raton, London, New York : SRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 520 p.
8. Akinshin N. S. Experimental Research on Detection and recognition of Ground Objects on the basic of Polarization Parameters. *Proc. MWS*, Kharkov. 1998, P. 485-491.
9. Staraj R., Ghio G., Damiano JP. Experimental study of curvature and line width effects on characterization of printed antennas fed by a microstrip lines. *International Symposium on Antennas JINA'96*, 12-14 November 1996, Nice, France, pp. 368-371.
10. Burnside W. D., Gilreath M. C., Kont B. M., Clerici G. L. Curved edge modification of compact range reflector *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 1987, №2, pp. 176-182.
11. Куммер В. Х., Джиллеспі Е. С. Антенніе измерения. *ТНПЭР*. 1978, Т. 66, №4. с. 143-173.
12. Вторинне випромінювання безпілотних літальних апаратів (математичне моделювання): монографія / за ред. О.І. Сухаревського. Харків : Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", 2022, 270 с.
13. Keller J. B. Geometrical Theory of Diffraction. *Journal of The Optical Society of America*. 1962. Vol. 52, № 2. pp. 116-130.
14. Сухаревский О. И., Василец В. А., Горельшев С. А., Нечитайло С. В., Ткачук К. И. Эффективная поверхность рассеяния (ЭГПР) объектов с неидеально отражающей поверхностью, имеющей изломы. *Зарубежная радиоэлектроника*. 2001, № 6. С. 41-48.
15. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section. 2nd ed. Boston, London: Artech House, 1993. 611 p.
16. Sukharevsky O., Gorelyshev S., Vasilets V. and Muzychenko A. Pulse signal scattering from perfectly conducting complex object located near uniform half-space. *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 29, 2000, pp. 169-185.
17. Gibson W. C. The Method of Moments in Electromagnetics. Boca Raton, London, New York: Chapman & Hall / Taylor & Francis Group. 2008. 288 p.
18. Volakis J. L., Sertel K. Integral Equation Methods for Electromagnetics. Raleigh, NC, USA: SciTech Publishing, Inc. 2012. 391 p.
19. Sukharevsky O. I., Zalevsky G. S., Vasilets V. A. Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving. *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications* / Edited by J. D. Taylor. Boca Raton London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2016. Pp. 195 – 235.
20. Сухаревський О. І., Залевський Г. С., Василець В. О., Галкін Ю. О., Горелишев С. А., Садовий К. В. Характеристики вторинного випромінювання тактичного безпілотного літального апарату у метровому, дециметровому і сантиметровому діапазонах хвиль. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2021. № 4(45). С. 82–92. <https://doi.org/10.30748/ntps.2021.45.10>.
21. Sukharevsky O. I., Zalevsky G. S., Vasilets V. A. Iterative Algorithm for Simulation of EM Scattering by Objects, Contained Constructive Elements of Different Electric Sizes. *XXII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, Sept. 25 – 28, 2017. Dnipro, Ukraine. Pp. 190 – 193.
22. Залевський Г. С. Характеристики вторинного випромінювання низьковисотних радіолокаційних цілей резонансних розмірів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2014. Вип. 2(30). С. 20–26.
23. Sukharevsky O.I., Gorelyshev S.A., Vasilets V.A., Muzychenko A.V. Backscattering of a pulse signal by a perfectly conducting object located near the interface of a uniform half-space. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 1999, 53(9-10), pp. 140–151. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i9-10.170.
24. Залевський Г. С., Сухаревський О.І. Метод расчета характеристик вторичного излучения наземных радиолокационных объектов резонансных размеров *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. Вип. 1(37). С. 112–121.
25. Geng N., Sullivan A., Carin L. Fast Multipole Method for Scattering from an Arbitrary PEC Target Above or Buried in a Lossy Half Space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001. Vol. 49, No. 5. P. 740–748.
26. Viola M. S. A New Electric Field Integral Equation for Heterogeneous Dielectric Bodies of Revolution Embedded within a Stratified Medium. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995. Vol. 43, No. 10. P. 1116–1122.
27. Залевський Г. С. Метод расчета характеристик рассеяния диэлектрических объектов резонансных *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. 2014. Вип. 2(39). С. 66-69.
28. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. Радио и связь, 1988. – 440 с.
29. Зоммерфельд А. Дифференциальные уравнения в частных производных физики / А. Зоммерфельд; пер. с нем. Изд-во иностранной лит., 1950. 456 с.

References (transliterated)

1. *Teoriia pryiniattia rishen orhanamy viiskovoho upravlinnia : monohrafiia* / V. I. Tkachenko, Ye. B. Smimov, H. A. Drobakha ta in. ; za red. V. I. Tkachenka, Ye. B. Smirnova. KhUPS, 2008. 545 p.
2. *Teoretychni osnovy pobudovy ta zastosuvannya rozviduvально-управляючих інформаційних систем протиповітряної оборони : monohrafiia* / S. P. Yarosh ; za red. I. O. Kyrychenka. KhUPS, 2012. 512 p.
3. Romanchenko I. S., Zahorka O. M., Butenko S. H., Deineha O. V. *Teoriia i praktyka borotby z malorozmirmymy nyzkolitnymy tsilamy (otsinka mozhlyvostei, tendentsii rozvytku zasobiv protypovitrianoi oborony)*. Polissia, 2011. 344 p.
4. Barton D. K. *Radar System Analysis and Modeling*. Norwood, USA. Artech House, Inc., 2005. 566 p.
5. *Radioelektronnyye sistemy : Osnovy postroyeniya i teoriya. Spravochnik* / pod red. YA. D. Shirmana. 2-ye izd. Radiotekhnika, 2007. 512 p.
6. *Radar Handbook* / M. I. Skolnik ed. 3d ed. New York : McGraw-Hill, 2008. 1348 p.
7. *Ultrawideband Radar. Application and Design*. J. D. Taylor ed. Boca Raton, London, New York : SRC Press Taylor & Francis Group, 2012. 520 p.
8. Akinshin N. S. Experimental Research on Detection and recognition of Ground Objects on the basic of Polarization Parameters. *Proc. MWS*, Kharkov. 1998, P. 485-491.
9. Staraj R., Ghio G., Damiano JP. Experimental study of curvature and line width effects on characterization of printed antennas fed by a microstrip lines. *International Symposium on Antennas JINA'96*, 12-14 November 1996, Nice, France, pp. 368-371.
10. Burnside W. D., Gilreath M. C., Kont B. M., Clerici G. L. Curved edge modification of compact range reflector *IEEE Trans. Antennas and Propag.* 1987, №2, pp. 176-182.
11. Kummer U. KH., Dzhylliespi E. S. Antennnyye izmereniya. *TIHER*. 1978, T.G. 66, №4. с. 143-173.
12. *Vtorynne vyprominiuvannya bezpilotnykh litalnykh aparativ (matematychne modeliuvannya): monohrafiia* / za red. O.I. Sukharevskoho. Kharkiv : Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet im. M.Ie. Zhukovskoho "Kharkivskiy aviatsiyniy instytut", 2022, 270 p.
13. Keller J. B. Geometrical Theory of Diffraction. *Journal of The Optical Society of America*. 1962. Vol. 52, № 2. pp. 116-130.
14. Sukharevskiy O. I., Vasilets V. A., Gorelyshev S. A., Nechitaylo S. V., Tkachuk K. I. Effektivnaya poverkhnost' rasseyaniya ob'yektov s neideal'no otrazhayushchey poverkhnost'yu, imeyushchey izlomy. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 2001, №6. S. 41-48.
15. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section. 2nd ed. Boston, London: Artech House, 1993. 611 p.
16. Sukharevsky O., Gorelyshev S., Vasilets V. and Muzychenko A. Pulse signal scattering from perfectly conducting complex object located near uniform half-space. *Progress In Electromagnetics*

- Research, PIER* 29, 2000, pp. 169–185.
17. Gibson W. C. *The Method of Moments in Electromagnetics*. Boca Raton, London, New York: Chapman & Hall / Taylor & Francis Group. 2008. 288 p.
 18. Volakis J. L., Sertel K. *Integral Equation Methods for Electromagnetics*. Raleigh, NC, USA: SciTech Publishing, Inc. 2012. 391 p.
 19. Sukharevsky O. I., Zalevsky G. S., Vasilets V. A. Modeling of Ultrawideband (UWB) Impulse Scattering by Aerial and Subsurface Resonant Objects Based on Integral Equation Solving. *Advanced Ultrawideband Radar: Signals, Targets, and Applications* / Edited by J. D. Taylor. Boca Raton London, New York: CRC Press Taylor & Francis Group. 2016. Pp. 195–235.
 20. Sukharevskyi O. I., Zalevskyi H. S., Vasylets V. O., Halkin Yu. O., Horielyshev S. A., Sadovy K. V. Kharakterystyky vtorynnoho vyprominiuvannya taktychnoho bezpilotnoho litalnoho aparatu u metrovomu, detsymetrovomu i santymetrovomu diapazonakh khvyl. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2021. № 4(45). P. 82–92. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.45.10>.
 21. Sukharevsky O. I., Zalevsky G. S., Vasilets V. A. Iterative Algorithm for Simulation of EM Scattering by Objects, Contained Constructive Elements of Different Electric Sizes. *XXII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*, Sept. 25–28, 2017. Dnipro, Ukraine. Pp. 190–193.
 22. Zalevskyi H. S. Kharakterystyky vtorynnoho vyprominiuvannya nyzkovyotsotnykh radiolokatsiinykh tsilei rezonansnykh rozmiriv. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*. 2014. Vyp. 2(30). P. 20–26.
 23. Sukharevsky O.I., Gorelyshev S.A., Vasilets V.A., Muzychenko A.V. Backscattering of a pulse signal by a perfectly conducting object located near the interface of a uniform half-space. *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, 1999, 53(9-10), pp. 140–151. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v53.i9-10.170.
 24. Zalevskiy G. S., Sukharevskiy O.I. sposob rascheta chert vtorichnogo izlucheniya nazemnykh radiolokatsionnykh ob"yektov rezonansnykh razmerov *Sistemy vooruzheniya i voyennaya tekhnika*. 2014. Vol. 1(37). P. 112–121.
 25. Geng N., Sallivan A., Carin L. Fast Multipole Method for Scattering from an Arbitrary PEC Target Above or Buried in a Lossy Half Space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2001. Vol. 49, No. 5. P. 740–748.
 26. Viola M. S. A New Electric Field Integral Equation for Heterogeneous Dielectric Bodies of Revolution Embedded within a Stratified Medium. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1995. Vol. 43, No. 10. P. 1116–1122.
 27. Zalevskiy G. S. Metod rascheta kharakteristik rasseyaniya dielektricheskikh ob"yektov rezonansnykh *Zbirk naukovikh prats' Kharkivs'kogo universitetu Povitrianykh Sil*. 2014. Vip. 2(39). P. 66–69.
 28. Vaynshteyn L. A. *Elektromagnitnyye volny*. Radio i svyaz', 1988. 440 p.
 29. Zommerfel'd A. *Differentsial'nyye uravneniya v chastnykh proizvodnykh fiziki* / A. Zommerfel'd; per. s nem. Izd-vo inostrannoy lit., 1950. 456 p.

Надійшло (received) 20.06.2025

Відомості про авторів /About the Authors

Горєлишев Станіслав Анатолійович / Horielyshev Stanislav – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, провідний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>; e-mail: port_6633@ukr.net

Залєвський Геннадій Станіславович / Zalevsky Gennady – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, начальник кафедри, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6173-0571>; e-mail: gennadiy.zalevsky@gmail.com