

УДК 621.396.96

І.Є. Ряполов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ВИСОКОЧАСТОТНИЙ АСИМПТОТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОДЕЛІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

У статті запропоновано високочастотний асимптотичний метод розрахунку полів, розсіяних конструктивними частинами безпілотного літального апарату, що враховує взаємодію багатошарової діелектричної оболонки з внутрішнім ідеально провідним об'єктом, а також дозволяє оцінити внесок діелектричних елементів у загальне розсіяне поле на основі методів короткохвильової дифракції. Побудована геометрична модель безпілотного літального апарату, що поєднує в собі як металеві частини, так і багатошарові діелектричні оболонки. Отримані результати моделювання та проведено аналіз характеристик розсіювання моделі безпілотного літального апарату для різних кутів опромінення.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, високочастотний асимптотичний метод розрахунку, ефективна поверхня розсіювання.

Вступ

Постановка проблеми. Однією з найбільш важливих радіолокаційних характеристик безпілотного літального апарату (БпЛА) є його ефективна поверхня розсіювання (ЕПР):

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

де R – відстань від точки прийому сигналу до БпЛА; $\vec{p}^{\text{пр}}$, \vec{p}^0 – орти поляризації приймальної і передавальної антен, відповідно; $\vec{E}^{\text{розс}}$ – комплексна амплітуда поля, розсіяного в напрямку точки прийому; \vec{E}^0 – комплексна амплітуда зондуєчої плоскої монохроматичної хвилі.

Саме ЕПР визначає радіолокаційну помітність БпЛА для засобів виявлення противника. Тому першочергового значення набувають завдання оцінки рівня і подальшого зниження ЕПР БпЛА.

Отримання інформації про ЕПР літальних апаратів можливе або за допомогою натурального (фізичного) експерименту, або розрахунковим шляхом на моделі відповідного літального апарату.

У зв'язку з досить високою вартістю і складністю проведення натурних експериментів особливої актуальності набуває розробка обчислювальних методів для розрахунку полів, розсіяних моделями літальних апаратів.

Аналіз літератури. У роботах, присвячених розробці методів розрахунку вторинного випромінювання [1 – 9] найчастіше розглядаються ідеально провідні (металеві) об'єкти з гладкою поверхнею. Врахування впливу матеріалів, що неідеально відбивають, на характеристики розсіювання проводиться тільки для модельних об'єктів простої форми.

Не розглядається вплив багатошарових діелектричних оболонок на характеристики розсіювання інших елементів конструкції. Тобто для розрахунку розсіювання об'єкта складної форми (у нашому випадку – БпЛА), виконаного із застосуванням діелектричних і композиційних матеріалів, не запропоновано методу, який би враховував основні фактори, що формують зворотне випромінювання.

Мета статті – розробка високочастотного асимптотичного методу розрахунку вторинного випромінювання таких складних радіолокаційних об'єктів як БпЛА.

Основна частина

1. Опис об'єкта дослідження

Зовнішній вигляд одного з можливих представників БпЛА "Сигма" зображений на рис. 1.

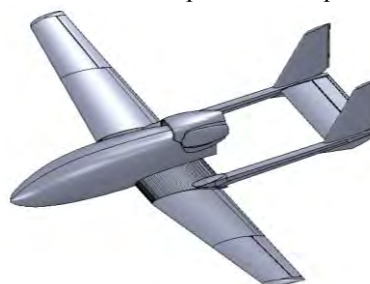


Рис. 1. Модель БпЛА "Сигма"

Планер літака має змішану конструкцію, центральна частина крила та хвостові балки виконані з металу, інші частини виготовлені з тришарового склопластику з наповнювачем з пінопласту.

У середній частині фюзеляжу знаходиться бортове і цільове обладнання, яке може бути промодельовано металевими (ідеально провідними) ящиками різної форми, так само як і відсік силової установки, який знаходиться в задній частині фюзеляжу.

Скористаємося способом моделювання як діелектричних, так і ідеально провідних ділянок поверхні об'єкта, що запропонований в [10].

Всі елементи поверхні об'єкта, що розсіюють розбиваються на кілька груп: гладка частина поверхні та кромочні ідеально провідні локальні ділянки розсіювання. Гладка частина поверхні апроксимується ділянками тривісних еліпсоїдів. Кромочні локальні ділянки досліджуваних об'єктів моделюються за допомогою ділянок прямих ліній або еліпсів. Для алгоритмів видимості використаний метод трасування променів, запропонований в [11].

Оскільки габаритні розміри розглянутих БПЛА становлять кілька метрів (наприклад, для БПЛА "Сигма" розмах крила – 8,7 м, довжина – близько 6 м, висота – 2,4 м), в сантиметровому діапазоні довжин хвиль опромінення БПЛА являють собою електрично великі розсіювачі. У разі повністю ідеально провідного об'єкта великих електричних розмірів до нього застосовні асимптотичні методи короткохвильової дифракції, такі як методи фізичної і геометричної оптики в їх класичній інтерпретації. У БПЛА частиною, що істотно розсіює є металевий об'ємний об'єкт, що знаходиться під тришаровою діелектричною оболонкою (фіюзеляж).

Врахування взаємодії багатшарової діелектричної оболонки з внутрішнім ідеально провідним об'єктом, а також вкладу діелектричних елементів у загальне поле на основі методів короткохвильової дифракції складає основу запропонованого методу розрахунку полів, розсіяних конструктивними елементами БПЛА.

2. Основні розрахункові співвідношення

Схематично обладнання БПЛА (об'ємні ідеально провідні об'єкти), що знаходиться під тришаровим діелектричним фіюзеляжем, зображено на рис. 2. Будемо вважати, що об'єкт, зображений на рис. 2, опромінюється плоскою хвилею:

$$\begin{aligned} \vec{E}^0(\vec{x}) &= \vec{p}^0 e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}; \\ \vec{H}^0(\vec{x}) &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}, \end{aligned} \quad (2)$$

де \vec{p}^0 – орт поляризації; \vec{R}^0 – орт напрямку поширення хвилі; ϵ_0 , μ_0 – абсолютні діелектрична і магнітна проникності вільного простору; k_0 – хвильове число у вільному просторі; \vec{x} – радіус-вектор поточної точки.

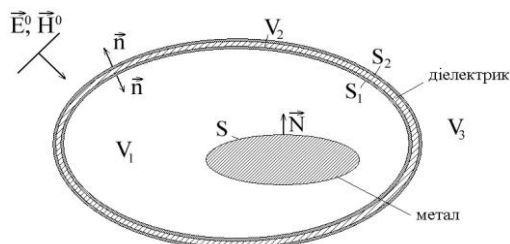


Рис. 2. Модель елемента конструкції БПЛА

Для повного поля, розсіяного в напрямку $-\vec{R}^0$, отримаємо вираз:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{E}^p(-\vec{R}^0) &\sim \\ \sim \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) - jk_0 \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R} \int_S \vec{I}(\vec{x}) \cdot \vec{\mathcal{E}}(\vec{x} | \vec{R}^0, \vec{p}) dS. \end{aligned} \quad (3)$$

Тут $\vec{\mathcal{E}}(\vec{x} | \vec{p})$ – тангенціальна складова (по відношенню до поверхні S) поля плоскої хвилі, що поширюється в напрямку \vec{R}^0 і пройшла через тришарову діелектричну оболонку фіюзеляжу, у точці \vec{x} на поверхні обладнання S ; $\vec{I}(\vec{x})$ – щільність поверхневого струму на S , яка наведена плоскою хвилею (\vec{E}^0, \vec{H}^0) , яка пройшла крізь фіюзеляж; \vec{p} – орт напрямку поляризації плоскої хвилі; R – відстань від об'єкта до точки спостереження; $\vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0)$ – поле, розсіяне у зворотному напрямку одним лише фіюзеляжем при відсутності ідеально провідного обладнання під ним. Інтегральне уявлення для поля $\vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0)$ може бути записано у вигляді [12]:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) &= -jk_0 \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R} \times \\ \times \iint_{S_2} \left[(\vec{H}_1^\perp(\vec{x}) \cdot \vec{p}) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \vec{E}_1^\perp(\vec{x}) (\vec{p} \times \vec{R}^0) \right] e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})} ds, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\vec{H}_1^\perp = (\vec{n} \times \vec{H}_1)$, $\vec{E}_1^\perp = (\vec{n} \times \vec{E}_1)$, (\vec{E}_1, \vec{H}_1) – поле поблизу (на) поверхні фіюзеляжу S_2 при відсутності обладнання під ним.

Якщо скористатися наближенням Кірхгофа, то поле (\vec{E}_1, \vec{H}_1) в кожній точці "освітленої" частини поверхні S_2 може бути наближено замінено полем на поверхні тришарового плоского евідистантного діелектрика, що дотичним чином підлаштоване у відповідній точці до фіюзеляжу. У цьому випадку, після ряду перетворень вираз (4) може бути представлено у вигляді:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) &= -2jk_0 \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R} \times \\ \times \iint_{S_{2осв}} \left[\rho_\perp p_\perp^2 - \rho_\parallel p_\parallel^2 \right] (\vec{R}^0 \cdot \vec{n}) e^{2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})} ds, \end{aligned} \quad (5)$$

де $p_\perp = (\vec{p} \cdot \vec{e}_\perp^0)$, $p_\parallel = (\vec{p} \cdot \vec{e}_\parallel^0)$, $\vec{e}_\perp^0 = \frac{\vec{R}^0 \times \vec{n}}{|\vec{R}^0 \times \vec{n}|}$,

$\vec{e}_\parallel^0 = (\vec{R}^0 \times \vec{e}_\perp^0)$, $\vec{n} = \vec{n}(\vec{x})$ – орт зовнішньої (по відношенню до області V_2) нормалі в точці \vec{x} , $\rho_\perp, \rho_\parallel$ – коефіцієнти відбиття від поверхні фіюзеляжу, знаходження яких може бути здійснено або з допомогою

геометропроменевої методики [13], або шляхом безпосереднього розв'язування граничних задач для рівнянь Максвелла в шарувато-однорідному напівпросторі [14]. Під II-ю поляризацією розуміється випадок, коли вектор напруженості електричного поля паралельний площині падіння (щодо плоскопаралельного шару, який підлаштований дотичним чином до "освітленої" частини фюзеляжу), під \perp -ю поляризацією розуміється ситуація, коли цей вектор перпендикулярний площині падіння.

Інтегральне подання (3) є основним розрахунковим співвідношенням для отримання розсіяного поля від розглянутого елемента конструкції БПЛА. Інтегральний член в (3) дає внесок обладнання (під фюзеляжем) в поле, яке розсіяне елементом "фюзеляж-обладнання" з урахуванням внутрішньосистемних електродинамічних взаємодій.

Враховуючи великі електричні розміри фюзеляжу і обладнання, доданки правої частини можуть бути обчислені наближено, використовуючи методи короткохвильової дифракції. Для розрахунку ідеально провідних частин конструкції БПЛА, таких як центроплан і хвостові балки, використовується наближення Кірхгофа.

Що стосується діелектричних елементів – порожнистих, які виготовлені з тришарового склопластику або суцільних з того ж матеріалу, таких як хвостове оперення, консолі крила, то для обчислення їх полів розсіяння (з урахуванням великих електричних розмірів цих елементів) може застосовуватися формула для обчислення $\vec{\epsilon}(-\vec{R}^0)$ в (3).

3. Результати математичного моделювання вторинного випромінювання БПЛА

У відповідності з конструкцією БПЛА "Сигма" для проведення розрахунків радіолокаційних характеристик (зокрема, ЕПР) була побудована модель його поверхні, яка представлена на рис. 3.

При моделюванні елементи конструкції БПЛА "Сигма", які відбивають електромагнітну хвилю були апроксимовані за допомогою 42 ділянок тривісних еліпсоїдів.

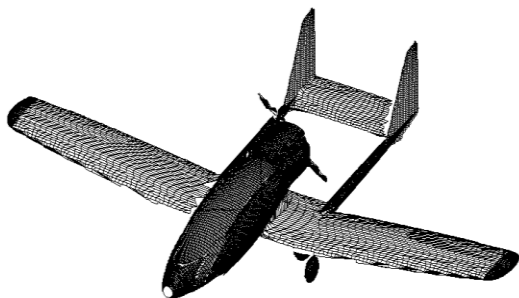


Рис. 3. Модель поверхні БПЛА "Сигма"

Конструкцію зазначеного БПЛА можна розділити на чотири частини: металеві конструкції планеру, неметалеві конструкції планеру, обтічник фюзеляжу,

металеве обладнання БПЛА (в основному розміщене під фюзеляжем). Для елементів тришарових діелектричних конструкцій, що використовувались під час моделювання, параметри зовнішніх шарів наступні $\epsilon' = 2,5$, $\mu' = 1$, $\delta = 0,5$ мм, для внутрішнього шару $\epsilon' = 1,05$, $\mu' = 1$, $\delta = 2$ мм.

Розглянуто залежності ЕПР від азимуту зондування при різних кутах місця опромінення. Розглянуті наступні кути місця зондування – 0 градусів (зондування в площині крила), -3 градуси і -10 градусів (зондування з нижньої півсфери – виявлення БПЛА наземними радіотехнічними системами різної дальності або висоти польоту). Довжина хвилі зондування 3см.

На рис. 4 показаний графік залежності ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування при опроміненні в площині крила.

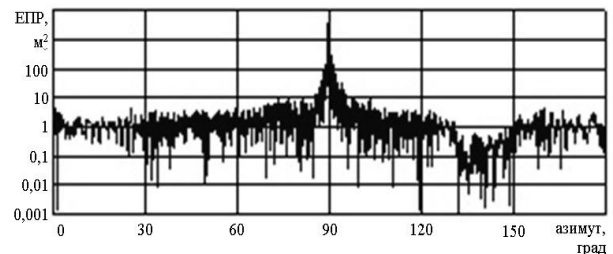


Рис. 4. Залежність ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування (зондування в площині крила)

На рис. 5 показані графіки залежності ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування при куті місця зондування -3 градуси.

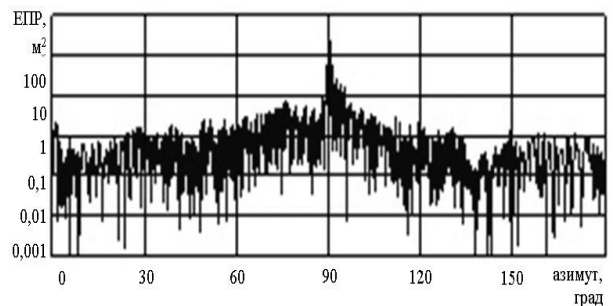


Рис. 5. Залежність ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування (кут місця зондування -3 градуси)

На рис. 6 показано графіки залежності ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування при куті місця зондування -10 градусів.

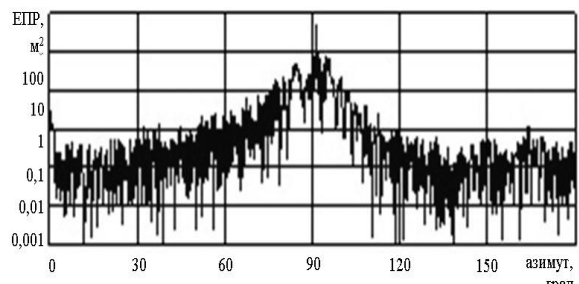


Рис. 6. Залежність ЕПР моделі БПЛА від азимуту зондування (кут місця зондування -10 градусів)

Аналіз результатів розрахунків дозволяє зробити наступні висновки. При зондуванні в площині крила середня ЕПР моделі БПЛА становить $16,8 \text{ м}^2$, медіанна ЕПР (значення, яке використовується для розрахунку дальності виявлення об'єкта з ймовірністю 0,5) становить $1,14 \text{ м}^2$. При куті місця зондування -3 градуси середня ЕПР моделі БПЛА становить $1,89 \text{ м}^2$, медіанна ЕПР становить $0,39 \text{ м}^2$. При куті місця зондування -10 градусів середня ЕПР моделі БПЛА становить $3,69 \text{ м}^2$, медіанна ЕПР становить $0,25 \text{ м}^2$.

Звертає на себе увагу різке зниження ЕПР при ухиленні від зондування в площині крила. Це обумовлено наявністю в конструкції великої кількості плоских ділянок, які розташовані перпендикулярно до площині крила і, відповідно, мають максимуми відбиття електромагнітної хвилі.

Висновки

В статті запропоновано високочастотний асимптотичний метод розрахунку полів, розсіяних конструктивними частинами безпілотного літального апарату, що враховує взаємодію багаточислової діелектричної оболонки з внутрішнім ідеально провідним об'єктом, а також внесок діелектричних елементів у загальне розсіяне поле на основі методів короткохвильової дифракції. Побудована геометрична модель безпілотного літального апарату, що поєднує в собі як металеві частини, так і багаточислові діелектричні оболонки.

На основі побудованої моделі БПЛА отримані результати моделювання та проведено аналіз характеристик розсіювання цієї моделі для різних кутів опромінення.

Результати можуть бути використані при удосконаленні існуючих та створенні перспективних БПЛА.

Список літератури

1. Мартынов Н.А. Оценка характеристик рассеяния электромагнитных волн на сложных телах, частично покрытых радиопоглощающими материалами / Н.А. Мартынов, Г.Н. Мироненко // *Радиотехника*. – 1996. – № 6. – С. 102-105.

2. Юссеф Н.Н. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных целей / Н.Н. Юссеф // *ТИИЭР*. – 1989. – Т. 77, № 5. – С. 100-112.

3. Цифровое моделирование полей рассеяния коротких радиоволн элементами сложных радиолокационных сцен / А.Б. Борзов, Э.А. Засовин, А.В. Соколов, В.Б. Сучков // *Радиоэлектроника*. – 1999. – № 12. – С. 21-29.

4. Кисель В.Н. Электродинамические модели сложных электрофизических объектов и эффективные методы расчета их полей рассеяния. Дисс... докт. техн. наук: 01.04.13, 05.12.07 – М.: ОИВТ РАН, 2004. – 339 с.

5. Габриэлян Д.Д. Задачи дифракции для поверхностей с радиопоглощающими покрытиями / Д.Д. Габриэлян, М.Ю. Звездина, Г.П. Синяевский // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2005. – №12. – С. 3-15.

6. Куриляк Д.Б. О симметричном электромагнитном облучении конечного конуса / Д.Б. Куриляк, З.Т. Назарчук // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 2000. – 5, N 1. – С. 29-37.

7. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы / Е.А. Штагер. – М.: Радио и связь, 1986. – 186 с.

8. Кулиш В.Г. Эффективная поверхность рассеяния систем антенна-обтекатель с обтекателями различной конфигурации / В.Г. Кулиш, В.Г. Ромашин // *Радиотехника*. – 2002. – №11. – С. 45-46.

9. Крячко А.Ф. Дифракция электромагнитных волн на теле "сфера-конус-сфера" с неоднородными поверхностным импедансом / А.Ф. Крячко, А.А. Самородов, Б.А. Самородов, В.М. Шкиль // *Изв. вузов: Радиоэлектроника*. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 26-30.

10. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко, [и др.]; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.

11. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. – М.: Мир, 1989. – 512 с.

12. Silver S. *Microwave Antenna Theory and Design* / S. Silver // *MIT Radiation Laboratory Series*. – New York: Mc Graw-Hill, 1949. – 318 p.

13. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.

14. Sukharevsky O.I. *Passing the Ultra-Wideband Signal in Layered-Uniform Half-Space with the Parameters of the Ground* / O.I. Sukharevsky, S.A. Gorelyshev // *J. Electromagn. Waves Appl.* – Vol. 11, 8. – P. 1091-1102.

Надійшла до редколегії 5.09.2016

Рецензент: д-р техн. наук, ст. наук. співробітник В.О. Василець, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ АСИМПТОТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

И.Е. Ряполов

В статье предложен метод расчета полей, рассеянных конструктивными элементами беспилотного летательного аппарата, учитывающий взаимодействия многослойной диэлектрической оболочки с внутренним идеально проводящим объектом, а также вклад диэлектрических элементов в общее поле на основе методов коротковолновой дифракции. Построена геометрическая модель беспилотного летательного аппарата, сочетающая в себе как металлические элементы, так и многослойные диэлектрические оболочки. Получены результаты моделирования и проведен анализ характеристик рассеяния модели беспилотного летательного аппарата для различных углов облучения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, высокочастотный асимптотический метод расчета, эффективная поверхность рассеяния.

HIGH-FREQUENCY ASYMPTOTIC METHOD OF CALCULATION OF THE SECONDARY RADIATION MODEL UNMANNED AERIAL VEHICLE

I.E. Ryapolov

The paper developed a method of calculating the fields scattered by structural elements of drone aircraft. The method takes into account the interaction of a multilayer dielectric shell with an inner perfectly conducting object, and the contribution of dielectric elements to the general field based on methods of short-wave diffraction. The model of the drone is designed, which combines elements of both metallic and multilayer dielectric shell. We obtained the simulation results and analyzed the scattering characteristics of drone model elements for different illumination angles.

Keywords: unmanned aerial vehicle, high-frequency asymptotic method of calculation, the effective radar cross-section.