

УДК 621.396.96

И.Е. Ряполов, В.А. Василец, О.И. Сухаревский, К.И. Ткачук

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ФЮЗЕЛЯЖА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье разработан асимптотический метод расчета вторичного излучения модели фюзеляжа беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: асимптотический метод, беспилотный летательный аппарат.

Введение

Постановка проблемы. Получение априорной информации о радиолокационных характеристиках воздушных объектов в настоящее время получают широкое развитие. В частности, такие сведения необходимы при проектировании радиолокационных средств обнаружения и оценки эффективности их работы, для оценки радиолокационной заметности аэродинамических объектов, техники военного назначения и проведения мероприятий по ее оптимизации. Получение радиолокационной информации об объектах посредством проведения натуральных и физических экспериментов связано со значительными материальными, организационными и временными затратами, поэтому одним из перспективных направлений является разработка методов математического моделирования вторичного излучения воздушных объектов.

Расчет характеристик рассеяния идеально отражающих объектов, охватываемых диэлектрической оболочкой малой толщины является актуальным при решении задач электродинамики в радиолокации. Примером такой задачи может быть расчет характеристик рассеяния вторичного излучения модели беспилотного летательного аппарата (БПЛА), фюзеляж которого выполнен из тонкого стеклопластика и внутри содержит идеально проводящие элементы.

Анализ литературы. В существующих современных методах расчета радиолокационных характеристик объектов [7, 8] предусмотрен учет некоторых основных факторов, влияющих на обратное рассеяния, однако общим их недостатком является отсутствие комплексного учета всей совокупности доминирующих факторов.

В [1] предложен метод расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) антенной системы с носовым диэлектрическим обтекателем. Сделана попытка оценить влияние обтекателя на ЭПР находящейся под ним параболической антенны. Предложенную в [1] методику можно обобщить и распространить на задачи расчета вторичного излучения (ЭПР) моделей БПЛА, представляющих собой

идеально проводящие объекты, находящиеся внутри диэлектрической оболочки (фюзеляжа БПЛА). Получение информации о характеристиках рассеяния подобных объектов позволит выявить участки поверхности объекта, вносящие доминирующий вклад в обратное рассеяния объекта в целом, оценить эффективность предполагаемых мероприятий по оптимизации радиолокационных характеристик как всего объекта, так и отдельных его участков.

Целью статьи является разработка асимптотического метода расчета вторичного излучения модели фюзеляжа беспилотного летательного аппарата.

Изложение основного материала

Планер самолета имеет смешанную конструкцию, центральная часть крыла (центроплан) и хвостовые балки выполнены из металла, остальные части изготовлены из стеклопластика с наполнителем из пенопласта. Пример компоновки БПЛА изображен на рис. 1.

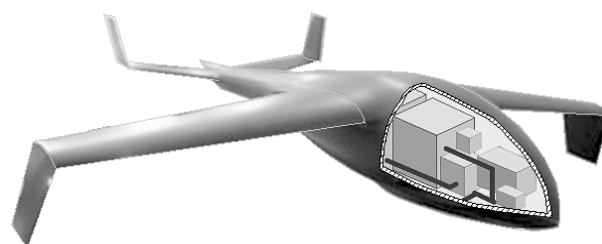


Рис. 1. Модель БПЛА

В средней части фюзеляжа находится оборудование (бортовое и целевое), которое может быть промоделировано металлическими (идеально проводящими) ящиками разной формы. Основными рассеивающими элементами модели фюзеляжа БПЛА являются идеально проводящие объемные объекты, находящиеся под диэлектрической оболочкой.

Воспользуемся способом моделирования как диэлектрических, так и идеально проводящих участков поверхности фюзеляжа. Методика аппроксимации такой поверхности была предложена в [1].

Все рассеивающие элементы металлической поверхности объекта разбиваются на несколько

груп: гладкая часть поверхности и кромочные идеально проводящие локальные участки рассеяния.

Гладкая часть поверхности аппроксимируется участками трехосных эллипсоидов [1]. Количество используемых эллипсоидов для каждого исследуемого объекта выбирается индивидуально в зависимости от сложности поверхности объекта и требуемой степени детализации, которая определяется длиной волны зондирующего сигнала при математическом моделировании характеристик вторичного излучения объекта.

Кромочные локальные участки исследуемых объектов моделируются с помощью описания линии излома поверхности [1]. Предполагается, что линия излома поверхности – участок плоской кривой. При этом, ребро криволинейного излома аппроксимируется участком эллипса, а ребро прямолинейного излома – отрезком прямой.

Метод расчета полей, рассеянных оборудованием БПЛА, находящимся под диэлектрической оболочкой

Схематически этот элемент конструкции БПЛА изображен на рис. 2.

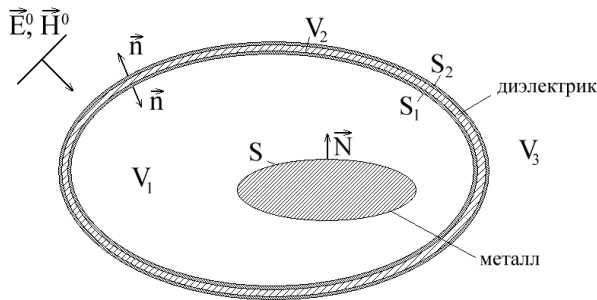


Рис. 2. Модель элемента конструкции БПЛА

Будем считать, что объект, изображенный на рис. 2, облучается плоской волной:

$$\begin{aligned} \vec{E}^0(\vec{x}) &= \vec{p}^0 e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}; \\ \vec{H}^0(\vec{x}) &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} (\vec{R}^0 \times \vec{p}^0) e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}, \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{p}^0 – орт поляризации; \vec{R}^0 – орт направления распространения волны; ϵ_0, μ_0 – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства; k_0 – волновое число в свободном пространстве ($k_0 = 2\pi/\lambda$, λ – длина падающей монохроматической волны); \vec{x} – радиус-вектор текущей точки. Введем поле вспомогательного точечного источника (диполя) в присутствии лишь области V_2 (т.е. фюзеляжа): $\vec{\mathcal{E}}(\vec{x}|\vec{x}_0, \vec{p})$, $\vec{\mathcal{H}}(\vec{x}|\vec{x}_0, \vec{p})$. Здесь \vec{x}_0 – точка расположения источника, \vec{p} – его вектор-момент. В работах [1, 2] исследовалось вто-

ричное излучение зеркальной антенны, расположенной под коническим обтекателем. Можно воспользоваться методом получения необходимых интегральных представлений полей, изложенным в этих работах.

Применив последовательно лемму Лоренца [3] в областях V_1 (граница $S \cup S_1$), V_2 (граница $S_1 \cup S_2$), V_3 (граница S_2) к искомому полному полю (\vec{E}, \vec{H}) и полю введенного вспомогательного источника $(\vec{\mathcal{E}}, \vec{\mathcal{H}})$, и просуммировав полученные равенства, введем интегральное представление для поля $\vec{E}(x_0)$ в любой точке пространства. Положив в этом интегральном представлении $\vec{x}_0 = -R\vec{R}^0$ и устремив $R \rightarrow \infty$, окончательно получим выражение для полного поля $\vec{E}^p(-\vec{R}^0)$, рассеянного в направлении $-\vec{R}^0$:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{E}^p(-\vec{R}^0) &= \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) + \\ &+ \frac{1}{j\omega} \int_S \vec{I}(\vec{x}) \cdot \vec{\mathcal{E}}(\vec{x}|\vec{R}^0, \vec{p}) dS. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0)$ – поле, рассеянное в обратном направлении одним лишь фюзеляжем в отсутствие идеально проводящего оборудования под ним; $\vec{\mathcal{E}}(\vec{x}|\vec{R}^0, \vec{p})$ – тангенциальная составляющая (по отношению к поверхности S) поля плоской волны, распространяющейся в направлении \vec{R}^0 и прошедшей через фюзеляж, в точке x на поверхности оборудования S ; $\vec{I}(\vec{x})$ – плотность поверхностного тока на S , наведенная прошедшей сквозь фюзеляж плоской волной (\vec{E}^0, \vec{H}^0) ; \vec{p} – орт направления поляризации плоской волны.

Интегральное представление (2) и является основным расчетным соотношением для получения рассеянного поля от рассматриваемого элемента конструкции БПЛА. Интегральный член в (2) дает вклад оборудования (под фюзеляжем) в поле, рассеянное элементом "фюзеляж-оборудование", с учетом внутрисистемных электродинамических взаимодействий. Формула (2) – точная.

Учитывая большие электрические размеры фюзеляжа и оборудования, слагаемые правой части могут быть вычислены приближенно, используя методы коротковолновой дифракции. Остановимся на вычислении первого слагаемого.

В случае отсутствия оборудования, применяя лемму Лоренца в области V_3 (внешней по отношению к фюзеляжу) к искомому полю и полю вспомогательного точечного электрического диполя в сво-

бодном пространстве, получим интегральное представление для поля $\vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0)$:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) &= \\ &= -jk_0 \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R} \iint_{S_2} \left[\vec{H}_1^\perp(\vec{x}) \cdot \vec{p} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \right. \\ &\left. - \vec{E}_1^\perp(\vec{x}) (\vec{p} \times \vec{R}^0) \right] \cdot e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})} ds, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\vec{H}_1^\perp = (\vec{n} \times \vec{H}_1)$, $\vec{E}_1^\perp = (\vec{n} \times \vec{E}_1)$, (\vec{E}_1, \vec{H}_1) – поле вблизи (на) поверхности S_2 фюзеляжа в отсутствии оборудования под ним.

Если воспользоваться приближением Кирхгофа, то поле (\vec{E}_1, \vec{H}_1) в каждой точке "освещенной" части поверхности S_2 может быть приближенно заменено полем на поверхности плоского эквидистантного диэлектрика, касательным образом подстроенного в соответствующей точке к фюзеляжу. Обозначим это поле (\vec{E}_1, \vec{H}_1) . В дальнейшем нас будут интересовать коэффициенты отражения и прохождения через такую конструкцию при произвольном угле падения на двух ортогональных поляризациях.

Если ввести разложение орта поляризации приемной (передающей) антенны

$$\vec{p} = p_\perp \vec{e}_\perp^0 + p_\parallel \vec{e}_\parallel^0, \quad (4)$$

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

$p_\parallel = (\vec{p} \cdot \vec{e}_\parallel^0)$, $\vec{n} = \vec{n}(\vec{x})$ – орт внешней (по отношению к области V_2) нормали в точке \vec{x} , то поле (\vec{E}_1, \vec{H}_1) может быть записано следующим образом:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(\vec{x}) &= \left[\rho_\perp(\vec{x}) p_\perp(\vec{x}) \vec{e}_\perp^1 + \right. \\ &\left. + \rho_\parallel(\vec{x}) p_\parallel(\vec{x}) \vec{e}_\parallel^1 \right] \cdot e^{jk_0(\vec{R}^1 \cdot \vec{x})}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \vec{H}_1(\vec{x}) &= \frac{1}{j\omega\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E}_1(\vec{x}) + \\ &+ \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[\rho_\perp(\vec{x}) p_\perp(\vec{x}) \vec{e}_\perp^1 - \right. \\ &\left. - \rho_\parallel(\vec{x}) p_\parallel(\vec{x}) \vec{e}_\parallel^1 \right] \cdot e^{jk_0(\vec{R}^1 \cdot \vec{x})}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\vec{e}_\perp^1 = \frac{\vec{R}^1 \times \vec{n}}{|\vec{R}^1 \times \vec{n}|}$; $\vec{e}_\parallel^1 = (\vec{R}^1 \times \vec{e}_\perp^1)$,

$\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - \vec{n}(\vec{x})(\vec{R}^0 \cdot \vec{n}(\vec{x}))$ – орт направления распространения плоской волны, отраженной от плоского слоя.

Если подставить приближенные выражения \vec{E}_1, \vec{H}_1 (5), (6) в (3) вместо (\vec{E}_1, \vec{H}_1) , то после элементарных преобразований получим окончательно:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{\mathcal{E}}(-\vec{R}^0) &= -2jk_0 \frac{e^{jk_0 R}}{4\pi R} \cdot \\ &\cdot \iint_{S_{2осв}} \left[\rho_\perp p_\perp^2 - \rho_\parallel p_\parallel^2 \right] \cdot (\vec{R}^0 \cdot \vec{n}) \cdot e^{2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})} ds. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь учтено, что для плоскопараллельного слоя (касательного к S_2) в точках S_2 $(\vec{R}^1 \cdot \vec{x})|_{S_{2осв}} = (\vec{R}^0 \cdot \vec{x})|_{S_{2осв}}$. Заметим, что определение "освещенной" части поверхности S_2 проводится методом, основанным на трассировке лучей [1, 4]. Нахождение же коэффициентов отражения $\rho_\perp, \rho_\parallel$ и соответствующих коэффициентов прохождения $\tau_\perp, \tau_\parallel$ для рассматриваемой плоской трехслойной конструкции может быть осуществлено, например, с помощью геометролучевой методики [5].

Однако более универсальной, на наш взгляд, является методика, основанная на непосредственном решении граничных задач для уравнений Максвелла [6]. Эта методика свободна от наличия неопределенностей, возникающих при направлениях облучения, близких к нормальным к поверхности облучения.

Для оценки вклада оборудования в рассеянное поле (второе слагаемое в правой части (2)) необходимо оценить (в приближении Кирхгофа) плотность поверхностного тока $\vec{I}(\vec{x})$ на S .

Соответственно можно предположить отсутствие изломов на поверхности S , которые не могут быть учтены с помощью приближения Кирхгофа, либо – вклад кромочных локальных центров рассеяния мал по сравнению с вкладом гладкой поверхности.

По аналогии с [1] поле, порождающее ток $\vec{I}(\vec{x})$ приближенно можно представить (в лучевой трактовке) в виде суммы двух полей: поля (\vec{E}_2, \vec{H}_2) , прошедшего через фюзеляж и попавшего на поверхность оборудования S и (\vec{E}_3, \vec{H}_3) , однократно переотраженного внутренней поверхностью фюзеляжа.

Легко видеть, что поле (\vec{E}_2, \vec{H}_2) может быть записано в виде:

$$\vec{E}_2(\vec{x}) = \left[\tau_\perp p_\perp \vec{e}_\perp^0 + \tau_\parallel p_\parallel \vec{e}_\parallel^0 \right] e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})}, \quad (8)$$

$$\vec{H}_2(\vec{x}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[\tau_\perp p_\perp \vec{e}_\parallel^0 - \tau_\parallel p_\parallel \vec{e}_\perp^0 \right] e^{jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{x})} \quad (9)$$

при $\vec{x} \in S$.

Так же, как и в [1] под II-й поляризацией понимается случай, когда вектор напряженности электрического поля параллелен плоскости падения (относительно плоскопараллельного слоя, подстроенного касательным образом к "освещенной" части фюзеляжа), под \perp -ой поляризацией понимается ситуация, когда этот вектор перпендикулярен плоскости падения.

Возможна ситуация, когда луч, прошедший через фюзеляж, не попадает непосредственно на поверхность S , а оказывается на ней только после преотражения от внутренней поверхности фюзеляжа. Интересующая нас компонента \vec{H}_3 этого поля может быть представлена в виде:

$$\vec{H}_3(\vec{x}) = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[-\rho_{\parallel}^1 p_{\parallel}^1 \vec{e}_{\perp}^2 + \rho_{\perp}^1 p_{\perp}^1 \vec{e}_{\parallel}^2 \right] \cdot e^{jk_0 \left[(\vec{R}^1 \cdot \vec{x}_1) + (\vec{R}^0 \cdot \vec{x}) \right]}, \quad (10)$$

где $\rho_{\parallel}^1, p_{\parallel}^1, \rho_{\perp}^1, p_{\perp}^1, \vec{e}_{\perp}^2, \vec{e}_{\parallel}^2$ – величины, отвечающие точке преотражения \vec{x}_1 на внутренней поверхности фюзеляжа. При этом точка $\vec{x} \in S$ (поверхность оборудования), а вектор $\vec{p}^1 = p_{\perp}^1 \vec{e}_{\perp}^2 + p_{\parallel}^1 \vec{e}_{\parallel}^2$ является комплексной амплитудой плоской волны, прошедшей через фюзеляж.

В таком случае плотность поверхностного тока $\vec{I}(\vec{x})$ на S может быть в приближении Кирхгофа записана в виде:

$$\vec{I}(\vec{x}) \approx 2 \left[\vec{N} \times (\vec{H}_2(\vec{x}) + \vec{H}_3(\vec{x})) \right] \quad (11)$$

при $\vec{x} \in S$. Заметим, что в случае фюзеляжа БПЛА поле \vec{H}_3 существенно меньше по амплитуде, чем \vec{H}_2 в силу достаточно хорошей радиопрозрачности фюзеляжа и с высокой степенью точности можно положить:

$$\vec{I}(\vec{x}) \approx 2 \left[\vec{N} \times \vec{H}_2(\vec{x}) \right], \quad (12)$$

где \vec{N} – внешняя к S единичная нормаль.

Вывод

Предложен высокочастотный асимптотический метод расчета поля, рассеянного фюзеляжем БПЛА, учитывающий взаимодействия диэлектрической оболочки с внутренним идеально проводящим объектом.

Список литературы

1. 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.
2. Сухаревский О.И. Вторичное излучение зеркальной антенной системы с коническим диэлектрическим обтекателем / О.И. Сухаревский, В.А. Василец // Сборник научных трудов ОННИ ВС. – Х.: ОННИ ВС, 2005. – Вып. 1 (1). – С. 92-100.
3. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
4. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. / Д. Роджерс. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
5. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
6. 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. – Pp. 1091-1102.
7. 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.
8. Юссеф Н.Н. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных целей. / Н.Н. Юссеф // ТИИЭР. – 1989. – Т. 77, № 5. – С. 100-112.

Поступила в редколлегию 24.01.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.П. Лещенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ВИСОКЧАСТОТНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МОДЕЛІ ФЮЗЕЛЯЖУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

І.Є. Ряполов, В.О. Василець, О.І. Сухаревський, К.І. Ткачук

У статті розроблений асимптотичний метод розрахунку вторинного випромінювання моделі фюзеляжу безпілотного літального апарату.

Ключові слова: асимптотичний метод, безпілотний літальний апарат.

HIGH-FREQUENCY METHOD OF CALCULATING SECONDARY RADIATION MODEL FUSELAGE UAV

I.E. Ryapolov, V.A. Vasilets, O.I. Sukharevsky, K.I. Tkachuk

The paper developed an asymptotic method of calculating secondary radiation model fuselage unmanned summer-state apparatus.

Keywords: asymptotic method, pilotless aircraft.