

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-141-151

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ
ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ
РАССЕЯНИЯ ИМИТАТОРА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА**

**Р.Н. АКИНШИН¹, А.А. БОРТНИКОВ²,
С.М. ЦЫБИН², Ю.И. МАМОН², Е.И. МИНАКОВ³**

¹Секция прикладных проблем РАН, г. Москва, Россия,

²Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, г. Тула, Россия

³Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Для сокращения затрат на натурные испытания отражающих свойств имитаторов баллистических объектов (БО) целесообразно разработать модель и алгоритм для расчета эффективной поверхности рассеяния таких радиолокационных объектов. В качестве имитатора баллистических объектов выбирается сложный радиолокационный отражатель, изготовленный из диэлектрика без потерь в виде сферической линзы Люнеберга с покрытием из высокоэлектропроводного сплава, а также усеченного конуса, диска и цилиндрических элементов. Предложены этапы апертурного варианта отражения от внутренней поверхности линзы Люнеберга. Разработана физическая модель отражения на элементах конструкции и методика моделирования с алгоритмом расчета эффективной поверхности рассеяния. Разработан алгоритм расчета резонансной эффективной поверхности рассеяния баллистических объектов. Этот алгоритм представлен в графическом виде. Представлен интерфейс вычислительного комплекса. В качестве имитатора баллистического объекта выбран сложный радиолокационный отражатель, изготовленный из диэлектрика без потерь в виде сферы с покрытием из высокоэлектропроводного сплава, а также усеченного конуса, диска и цилиндрических элементов. Графически представлены сравнительные индикатрисы имитатора баллистических объектов. Сделан вывод по сравнительному анализу результатов измерения в натуральных условиях и результатов моделирования. Приведены примеры численных расчетов ЭПР головной части имитатора БО с увеличенной ЭПР и увеличенной всеракурсностью обзора. Исследованы варианты головных частей имитатора БО с увеличенной ЭПР и увеличенной всеракурсностью обзора с оптимальным размещением радиолокационного диэлектрического отражателя и уголкового блока с секционным размещением диэлектрических отражателей.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеяния, баллистический объект, радиолокационный отражатель.

ВВЕДЕНИЕ

Для сокращения затрат на натурные испытания отражающих свойств имитаторов баллистических объектов (БО) целесообразно разработать модель и алгоритм для расчета эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) таких радиолокационных объектов. В качестве имитатора БО был выбран сложный радиолокационный отражатель, изготовленный из диэлектрика без потерь в виде сферической линзы Люнеберга с покрытием из высокоэлектропроводного сплава, а также усеченного конуса, диска и цилиндрических элементов.

Апертурный вариант отражения от внутренней поверхности линзы Люнеберга в ограниченном объеме модели баллистического объекта, с учетом поляризации набегающей волны и коэффициента прохождения без потерь через диэлектрик, включает несколько этапов.

**ЭТАПЫ АПЕРТУРНОГО ВАРИАНТА ОТРАЖЕНИЯ
ОТ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

На первом этапе волна набегающая на поверхность диэлектрической сферы R с плотностью потока S , длиной волны λ от радиолокационной станции (РЛС), вследствие этого волна поляризуется и отклоняется от нормали к поверхности на угол ψ_1 .

Максимальная напряженность E_m в линзе развивается у границы перехода от воздушной среды в диэлектрик, что объясняется уменьшением волнового сопротивления среды диэлектрика [1, 2].

Второй этап начинается с момента прохождения через зону диэлектрика $2R = d$, $\varepsilon = 3$, $\text{tg } \delta = 0,001$ и связан с уменьшением когерентной составляющей напряженности.

Третий этап начинается с момента падения на внутреннюю поверхность сферы с центральным углом $\varphi_0 = 180^\circ$, $R = 50$ мм, толщиной покрытия $\delta = 6$ мкм, где граница раздела диэлектрик-металл становится вторичным источником излучения (рис. 1).

Рассеяние от БО описывается системой рекуррентных дифференциальных уравнений для некогерентного радиолокационного поля [2].

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \sigma_1(\phi)}{\partial \phi^2} + \frac{1}{4k_{\text{omp}}} \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \sigma_0(\phi) = \bar{k} \varepsilon_0 \Phi_1 \left| \frac{\partial (E_1^2 + E_0^2 / E_m^2)}{\partial r} \right|, \\ \frac{\partial^2 \sigma_0(\phi)}{\partial \phi^2} + \frac{1}{4k_{\text{omp}}} \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \sigma_0(\phi) = 0, \\ \frac{\partial^2 E_1(r)}{\partial r^2} + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{\sqrt{\varepsilon_\perp^3}}{\chi} \frac{N_0 E_0(r)}{\text{tg } \delta_{\text{дизл}}} = \kappa_1 \varepsilon_0 k \Phi_1 \Phi_2 \gamma_0 \frac{\partial (\rho_m \ln \varepsilon)}{\partial \rho_m} \left| \frac{\partial E(f, r_1)}{\partial r_1} \right|, \\ \frac{\partial^2 E_0(r)}{\partial r^2} + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{\sqrt{\varepsilon_\perp^3}}{\chi} \frac{N_0 E_0(r)}{\text{tg } \delta_{\text{дизл}}} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где

$$\Phi_1 = \begin{cases} 0 & \text{— внутри полости,} \\ 1 & \text{— снаружи;} \end{cases} \quad \Phi_2 = \sum_{i=1}^n \Phi_i / n, \quad (2)$$

где n – количество элементов.

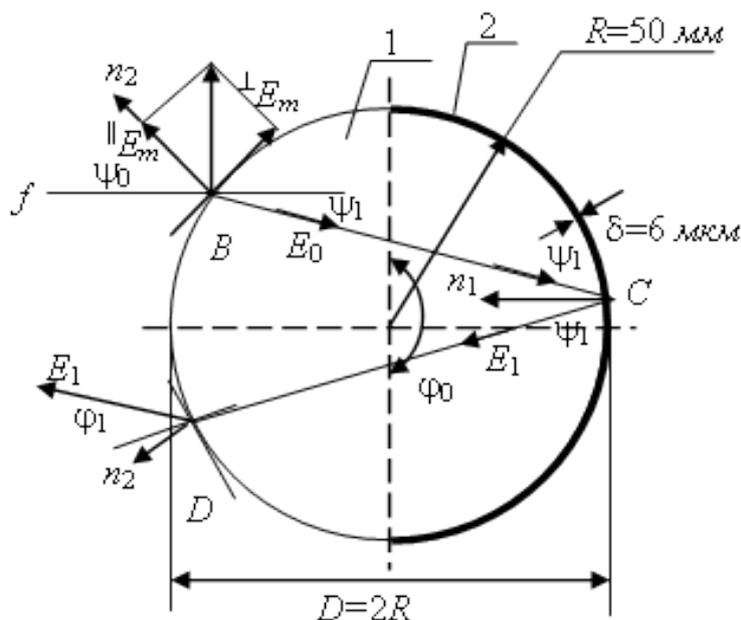


Рис. 1. Прохождение луча в сферической линзе Люнеберга
Fig. 1. Passing of a beam in a spherical lens of Lyuneberg

Граничные условия на поверхности S_c с воздушной средой

$$\sigma(E_s - E_\infty) = -\frac{x}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial n}, \quad (3)$$

где σ – проводимость окружающей среды; E_∞ – напряженность на ∞ ; E_s – напряженность на поверхности S ; x – удельный коэффициент электропроводности.

Граничные условия на поверхности S_c контакта радиолокационного поля со слоями конструкции

$$\frac{1}{\delta}(E_0 - E_1) = -x \frac{\partial E}{\partial n}, \quad (4)$$

где δ – глубина проникновения волны в металл; E_0 – когерентная составляющая напряженности; E_1 – некогерентная составляющая напряженности; x – удельный коэффициент электропроводности в слое; E – суммарная когерентная и некогерентная составляющая напряженности поля [4–7].

Граничные условия для линзы ЭПР при 0°

$$\sigma_1(0) = \pi(R_1 + R_2)^2 k_{omp}, \quad (5)$$

где R_1 – радиус передней полусферы линзы; R_2 – радиус задней полусферы линзы; k_{omp} – коэффициент отражения от поверхности линзы.

Граничные условия для диска при 360°

$$\sigma_1(360^\circ) = \pi(R_{\text{дн.}})^2 k_{omp}, \quad (6)$$

где $R_{\text{дн.}}$ – радиус дна; k_{omp} – коэффициент отражения от дна.

Условия излучения для правой части системы (1), (2)

$$\int_z \frac{\partial E}{\partial r} \Big|_{r=r_1} \Phi_1 dS. \quad (7)$$

Представим радиолокационное поле в виде

$$E = [N]\{E\} = [N_i, N_j, N_k] = \begin{Bmatrix} E_0 + E_1 \\ E_0 + E_1 \\ E_0 + E_1 \end{Bmatrix}, \quad (8)$$

где N_i, N_j, N_k – функция формы в узлах конечных элементов (КЭ).

Математическое описание рассматриваемых процессов представлено с помощью системы двух взаимосвязанных функционалов [8–12]:

- функционала потерь $\Phi^n(E(r))$;
- функционала рассеяния $\Phi^p(\sigma(r))$.

Запишем для задачи функционал потерь в виде

$$\Phi^n = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \sum_i \left[\chi \left(\frac{\partial E_1}{\partial r} \right)^2 \right] + \left[\left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \frac{\varepsilon N_0}{L_n} E_0 \right] \right\} dV - 4\pi \int_{z_1} \sigma (E_z - E_x) dS - \int_{z_1} \frac{1}{\delta} (E_0 - E_x) dS + \int_{z_1} k (1 - q_{01}) \frac{Q}{\eta} dV, \quad (9)$$

где E_1 – напряженность некогерентного поля; E_0 – напряженность когерентного поля; r – радиальная координата; χ – коэффициент удельной проводимости; ε_{\perp} – диэлектрическая проницаемость; q_{01} – интенсивность поля; k – коэффициент масштабирования; γ_0 – коэффициент прохождения через диэлектрик; N_0 – коэффициент преломления; L_n – коэффициент потерь.

Запишем функционал рассеяния в виде

$$\Phi^p = \int_V \left\{ \sum_i \left[\left(\frac{\partial \sigma_1}{\partial \phi} \right)^2 \right] + \frac{1}{4k_{omp}} \left[\sigma_0 \left(\frac{r}{\lambda} \right)^2 \sigma_0 \right] \right\} dV - 4\pi k_0 \gamma_0 \int_z \Phi_1 \left| \frac{\partial (E_1^2 + E_0^2 / E_m^2) (\cos \phi_1^1 z + \sin \phi_1^1)}{\partial r} \right| dS, \quad (10)$$

где σ_1 – ЭПР некогерентного поля; σ_0 – ЭПР когерентного поля; ϕ_i – угловая координата; k_0 – коэффициент интерференции; Φ_1 – единичная поверхностная функция; k_{omp} – коэффициент отражения; E_{max} – максимальная напряженность поля; ϕ_1^1 – угол поляризации для волны.

При использовании известных соотношений метода конечных элементов для (9) и (10), матричные уравнения могут быть определены.

Матрица проводимости имеет вид [12–14]

$$[k^1] = \int_{S_1} \chi [B]^T [B] dS_1, \quad (11)$$

где χ – коэффициент удельной проводимости;
 $[B]^T$ – транспонированная матрица градиентов функции формы;
 S_1 – поверхностная площадь КЭ с покрытием.

Матрица отражения имеет вид

$$\mathbf{K}^2 = \int_{S_2} \kappa_{omp} \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS_2, \quad (12)$$

где κ_{omp} – коэффициент отражения; \mathbf{N}^T – транспонированная матрица функции формы; S_2 – поверхностная площадь КЭ.

Матрица прохождения имеет вид

$$\mathbf{K}^3 = q_{01} \int_{S_3} \gamma_0 k \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS_3, \quad (13)$$

где γ_0 – коэффициент прохождения через диэлектрик; k – коэффициент масштабирования; q_{01} – интенсивность излучаемого поля от первичного источника; S_3 – поверхностная площадь КЭ для диэлектрика.

Матрица преломления имеет вид

$$\mathbf{K}^0 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \int_{S_0} N_0 \boldsymbol{\varepsilon}^T dS_0, \quad (14)$$

где ω – частота вторичного излучения; c – скорость света; S_0 – поверхностная площадь КЭ вторичного источника.

Окончательно запишем матрицу рассеяния в виде

$$\mathbf{K}^p = \sigma_m U(kr) V_0^2 \{\mathbf{K}^1 + \mathbf{K}^0 - \mathbf{K}^2 + \mathbf{K}^3\}, \quad (15)$$

где σ_m – асимптота ЭПР; $U(kr)$ – энергетическая функция рассеяния; V_0 – функция ослабления на элементах рассеяния.

Рекуррентные матричные системы для радиолокационного поля с граничными условиями можно записать в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{K}^p \{\sigma_1\} &= \mathbf{f}_p^e, & \mathbf{K}^1 \{E_1\} + \mathbf{K}^0 \{E_0\} &= \mathbf{f}_n^e, \\ \mathbf{K}^p \{\sigma_1\} &= 0, & \mathbf{K}^1 \{E_0\} + \mathbf{K}^0 \{E_0\} &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\mathbf{f}_n^e = \int_V \mathbf{N}^T (1 - q_{01}) \frac{kQ}{\eta_0} dV, \quad (17)$$

$$Q = \langle S_1 \rangle, \quad \langle S_1 \rangle = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{r_1}{r_1^1}\right)^2 E_m^2 \sin \varphi. \quad (18)$$

Здесь η_0 – волновое сопротивление воздуха; k – коэффициент интерференции; S_1 – поток мощности от вторичного источника (линза); q_{01} – интенсивность излучаемого поля от первичного источника (РЛС); r_1 – граничное расстояние до линзы; r_1^1 – расстояние по апертуре БО с линзой; φ – угол облучения БО; E_m – максимальная напряженность поля от РЛС; ε_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕЗОНАНСНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ

Алгоритм расчета резонансной ЭПР БО представлен на рис. 2.

Для расчета резонансной ЭПР неоднородных конструкций БО реализован интерфейс, состоящий из трех панелей, в первой визуализирована БО, а во второй реализован набор геометрических и радиолокационных параметров, в третьей таблицы табулированных значений результатов экспериментальных замеров и текущие значения результатов вычислений и графики зависимостей (рис. 3).

Сравнительные индикатрисы БО, по которым оценивается вероятность обнаружения, количество имитаторов БО при проведении испытаний, представлены на рис. 4 [3]. Номера индикатрис соответствуют: 1 – со сферическим отражателем (в безэховых условиях); 2 – с отражателем 1 и блоком уголкового отражателей (в безэховых условиях); 3 – с отражателем 1 и блоком уголкового отражателей (в натуральных условиях).

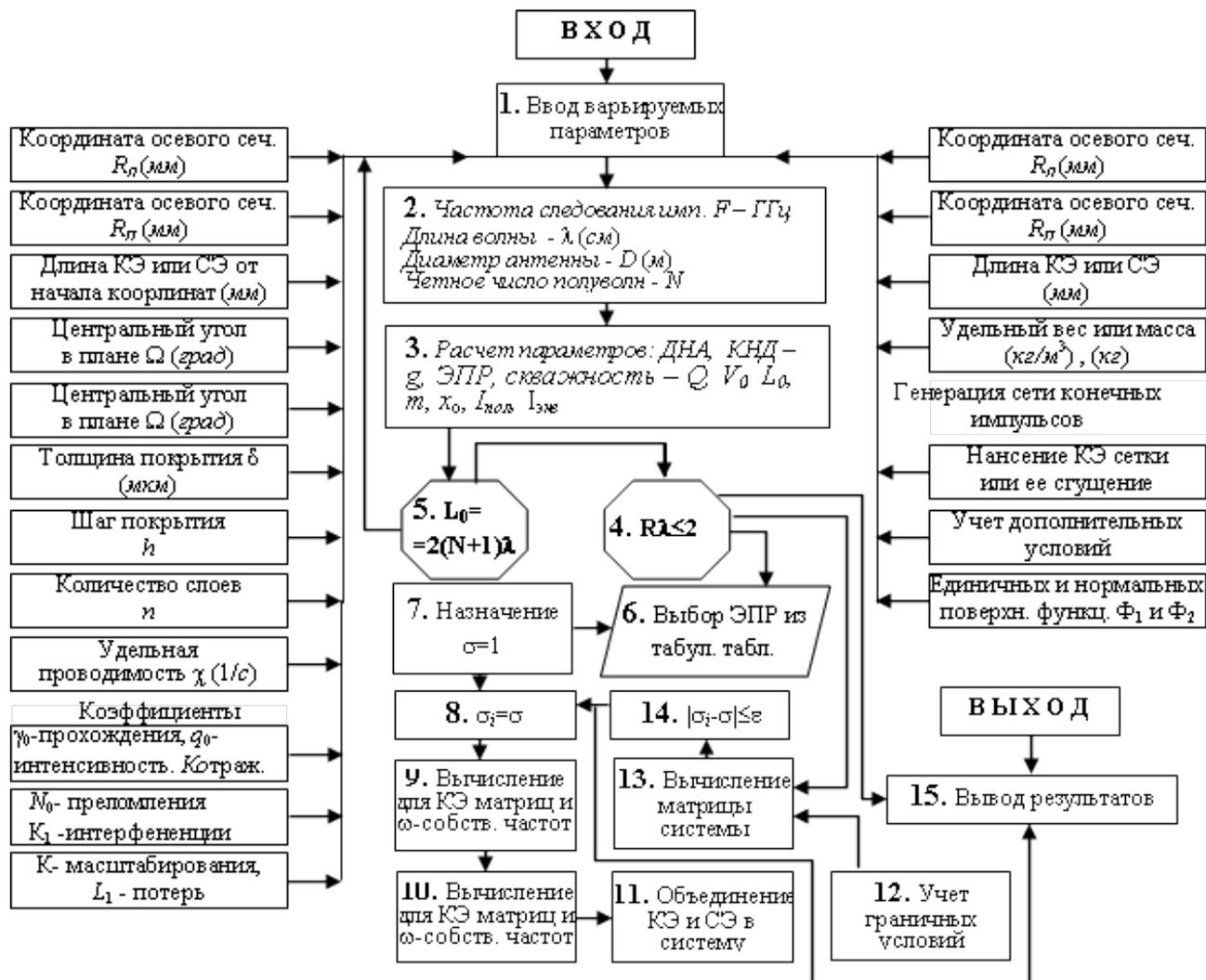


Рис. 2. Алгоритм расчета резонансной ЭПР БО
Fig. 2. Algorithm of calculation of resonant EPR BO

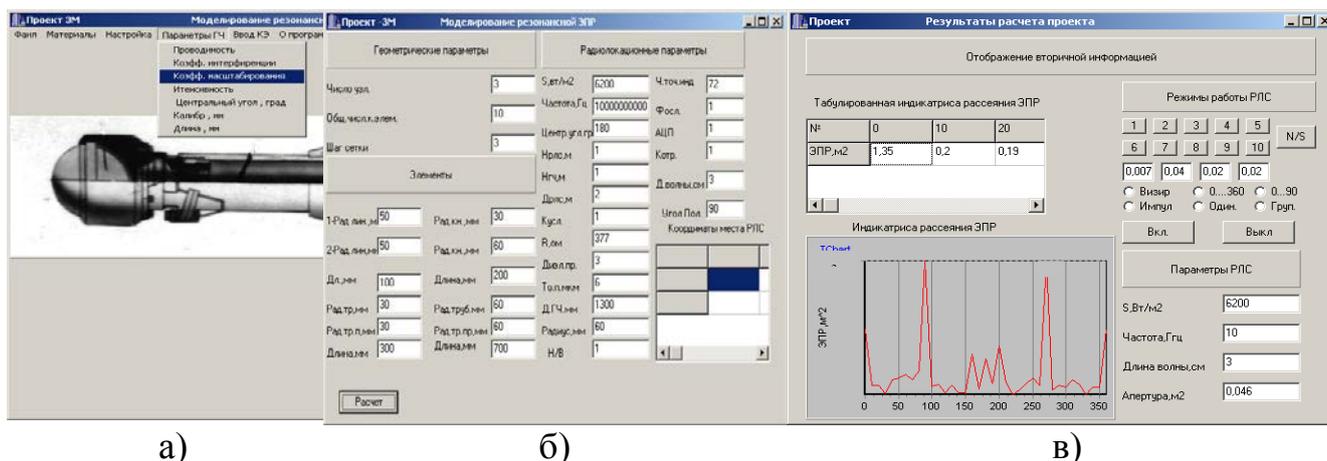


Рис. 3. Интерфейс вычислительного комплекса:

а – визуализация БО; б – геометрические и радиолокационные параметры;
в – таблицы табулированных значений результатов экспериментальных замеров
и текущие значения результатов вычислений

Fig. 3. Interface of the computer system:

a) visualization of BO; b) geometrical and radar parameters;

c) tables of the tabulated values of results of the experimental samplings and the current values of results of computation

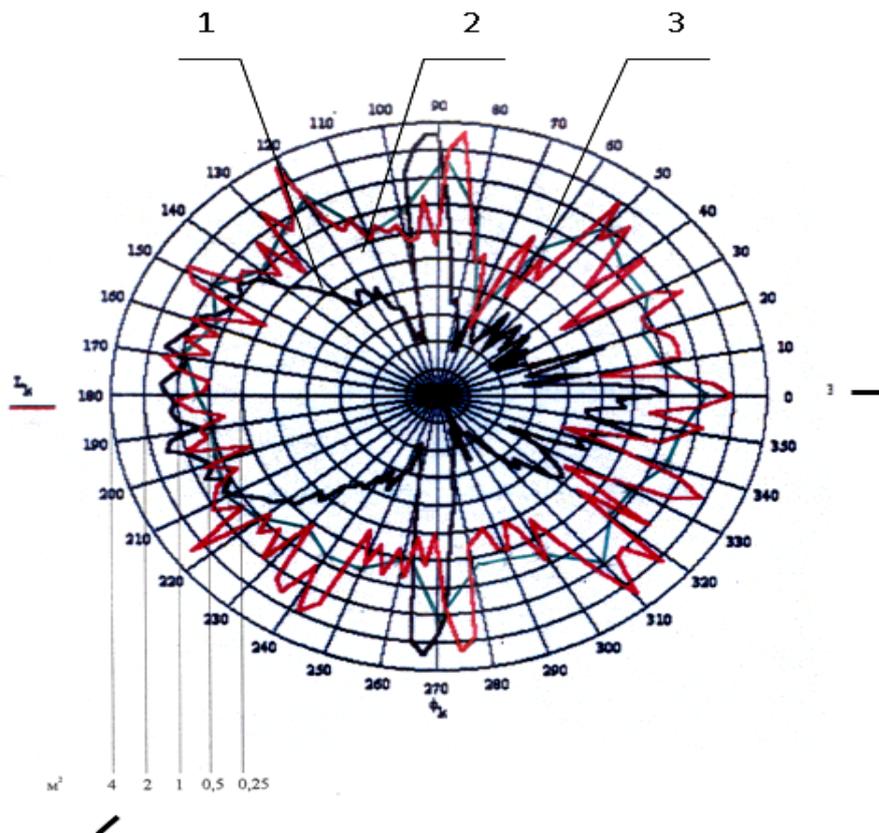


Рис. 4. Сравнительные индикатрисы имитатора БО
Fig. 4. Comparative indikatrissa of the BO simulator

Сравнительный анализ результатов измерения в натуральных условиях и результатов моделирования показывает, что погрешность моделирования не превышает 3 Дб.

В целях улучшения процесса формирования ЭПР БО с учетом резонансной частоты проводили модифицирование метода параболического уравнения [12]. Модифицирование привело к определению эффективной площади с учетом резонанса на радиолокационной отражательной системе (сферический диэлектрический отражатель и блок уголкового отражателей). В качестве численного метода был выбран метод конечных элементов (МКЭ). Предполагается, что в модели учитываются поляризация волны и условия безэховости [13]. Использование МКЭ приводит к увеличению времени счета при уменьшении размеров элементов и увеличении их количества, а именно, количество поперечных перегородок в уголкового блоке, переходя к резонансным явлениям, что накладывает условия на решение дифференциальных уравнений в частных производных для некогерентного поля по параллельному \parallel и перпендикулярному \perp направлению излучения на системе $\det \|A\| = 0$ [13, 14]. Учитывая вышеизложенное, расчетные и замеренные индикатрисы рассеяния предпочтительно затабулировать таким образом, чтобы угловой шаг был равен 10° и равномерно изменялся от 0 до 360° , при этом амплитудные значения выводятся таким образом, чтобы удобно было вычислять коэффициент масштабирования. Были проведены численные исследования ЭПР с учетом резонанса по разработанной модели в зависимости от угла облучения с стеклопластиковым обтекателем и без него. Результаты исследований (рис. 4) показывают, что ЭПР головной части (ГЧ) имитатора БО уже в значительной степени увеличивается при углах облучения от 10° до 80° , а при углах облучения от 80° до 130° , требуемое значение фактически обеспечивается за счет высокоэлектропроводного покрытия. Амплитуда основных лепестков при 90° и 270° составляет $3,8 \text{ м}^2$ соответственно без уголкового блока, а при угле облучения 0° составляет 2 м^2 и соответственно без блока $1,35 \text{ м}^2$.

Аппроксимирующие полиномы ЭПР индикатриса имитатора БО, полученная из эксперимента и расчетная по разработанной модели, представлена в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Table 1

№	Угловое направление, град	Аппроксимирующие полиномы (огibaющая) σ_m , м ²
1	0–40	$810^{-6} \sigma_m^4 - 0,0007 \sigma_m^3 + 0,0206 \sigma_m^2 + 0,2611 \sigma_m + 1,35$;
2	40–90	$510^{-6} \sigma_m^4 - 0,0013 \sigma_m^3 + 0,121 \sigma_m^2 + 4,8181 \sigma_m + 71,42$;
3	90–130	$110^{-5} \sigma_m^4 - 0,0063 \sigma_m^3 + 1,071 \sigma_m^2 - 80,487 \sigma_m + 2261,5$;
4	130–170	$-110^{-5} \sigma_m^4 + 0,0072 \sigma_m^3 - 1,5851 \sigma_m^2 + 154,39 \sigma_m - 5619,7$;
5	170–190	$-0,0057 \sigma_m^2 + 2,059 \sigma_m - 185,07$;
6	190–230	$-910^{-6} \sigma_m^4 + 0,0079 \sigma_m^3 - 2,527 \sigma_m^2 + 359,62 \sigma_m - 19149$;
7	230–260	$-910^{-7} \sigma_m^4 + 0,0008 \sigma_m^3 - 0,28 \sigma_m^2 + 44,532 \sigma_m - 2581,6$;
8	260–280	$-0,026 \sigma_m^2 + 14,036 \sigma_m - 1891,4$;
9	280–310	$0,0009 \sigma_m^2 - 0,5557 \sigma_m + 82,653$;
10	310–340	$0,0017 \sigma_m^2 - 1,1205 \sigma_m + 185,07$;
11	340–360	$1,0252 \sigma_m + 1,1819$;

Таблица 2
Table 2

№	Угловое направление, град	Аппроксимирующие полиномы (огibaющая) σ_m , м ²
1	0–40	$210^{-6} \sigma_m^4 - 0,0001 \sigma_m^3 + 0,0012 \sigma_m^2 + 0,0019 \sigma_m - 1,39$;
2	40–90	$110^{-5} \sigma_m^4 - 0,0025 \sigma_m^3 + 0,2352 \sigma_m^2 - 9,6315 \sigma_m + 145,52$;
3	90–130	$-2 \cdot 10^{-5} \sigma_m^4 + 0,0109 \sigma_m^3 - 1,8145 \sigma_m^2 + 132,81 \sigma_m + 3613$
4	130–170	$-6 \cdot 10^{-6} \sigma_m^4 + 0,0038 \sigma_m^3 - 0,8712 \sigma_m^2 + 89,711 \sigma_m - 3456,7$
5	170–190	$-8 \cdot 10^{-6} \sigma_m + 1,47$
6	190–230	$-310^{-6} \sigma_m^4 - 0,0024 \sigma_m^3 + 0,7664 \sigma_m^2 - 108,22 \sigma_m + 5721,8$
7	230–260	$-210^{-4} \sigma_m^4 - 0,1773 \sigma_m^2 + 42,728 \sigma_m + 3433,3$
8	260–280	$-0,0139 \sigma_m^2 + 7,6375 \sigma_m - 1042,7$
9	280–310	$0,0052 \sigma_m^2 - 3,1304 \sigma_m + 470,82$
10	310–340	$0,0034 \sigma_m^2 - 2,1686 \sigma_m + 345,6$
11	340–360	1,39

В результате анализа данных, приведенных в таблицах, установлено, что ЭПР ГЧ имитатора БО на коэффициенте удельной проводимости $5,2 \cdot 10^{-17}$ 1/с:

- по разработанной модели $\sigma_n^{\phi} = 1,428$ м²;
- по эксперименту $\sigma_n^{\phi} = 1,78$ м².

Для получения численных значений ЭПР ГЧ имитатора БО разработанной модели без учета обтекателя, необходимо учесть коэффициент прохождения через стеклопластиковый обтекатель, который составляет 3.

Указанное является следствием повышения технических требований к радиопрозрачности стеклопластикового обтекателя. Отметим, что все приведенные индикатрисы повернуты на угол 90^0 и в программном обеспечении предусмотрена возможность поворота индикатрис на угол 90 , 180 и 270^0 . Из этих рисунков видно также, что ЭПР ГЧ имитатора БО с обтекателем и без него обладают близкой формой и амплитудой.

ВЫВОДЫ

В качестве имитатора баллистического объекта выбран сложный радиолокационный отражатель, изготовленный из диэлектрика без потерь в виде сферы с покрытием из высокоэлектропроводного сплава, а также усеченного конуса, диска и цилиндрических элементов. Графически представлены сравнительные индикатрисы имитатора баллистических объектов.

Приведены примеры численных расчетов ЭПР ГЧ имитатора БО с увеличенной ЭПР и увеличенной всеракурсностью обзора, расчет показал высокую точность метода, которая составляет не более 1–5 %. Определены расчетные индикатрисы ЭПР вариантов ГЧ имитатора БО.

По результатам исследованы варианты ГЧ имитатора БО с увеличенной ЭПР и увеличенной всеракурсностью обзора с оптимальным размещением радиолокационного диэлектрического отражателя и углового блока с секционным размещением диэлектрических отражателей при этом показано, что всеракурсность обзора имитатора БО увеличивается в 2 раза, а ЭПР ГЧ увеличивается в 4 раза. Такой результат зависит от характеристик материала диэлектрика и стеклопластика, которые показывают, что резонансная частота составляет 10–14 ГГц, при толщине высокоэлектропроводного покрытия, которая составляет от 6 до 9 мкм на поверхности диэлектрического отражателя и 15–20 мкм на поверхностях углового блока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: ЗАО «Маквис», 1998. 825 с.
2. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. 183 с.
3. Макаровец Н.А., Себякин А.Ю. Измерение эффективной площади рассеяния головной части имитатора воздушной цели // Сборник тезисов докладов XXIV научной сессии, посвященной Дню радио. Тула: ТулГУ, 2006. С. 176–179.
4. Sullivan D.M. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method. NY, IEEE Press, 2000, 165 p.
5. Taflove A., Hagness S. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, NY, Artech House, 2000, 467 p.
6. Gibson D. The Method of Moments in Electromagnetics. NY, Chapman&Hall CRC, 2008, 594 p.
7. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. М.: Бином, 2009. 352 с.
8. Миллиметровая радиолокация: методы обнаружения и наведения в условиях естественных и организованных помех / А.Б. Борзов [и др.]. М.: Радиотехника, 2010. 376 с.
9. Методы синтеза геометрических моделей сложных радиолокационных объектов / А.Б. Борзов [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 5. С. 55–63.
10. Антифеев В.Н., Борзов А.Б., Сучков В.Б. Физические модели радиолокационных полей рассеяния объектов сложной формы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 61 с.
11. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Советское радио. 1975. 244 с.

12. Майзельс Е.Н., Торгованов В.А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. М.: Советское радио. 1972. 232 с.

13. Теоретические и экспериментальные исследования поляризационных характеристик двугранных и трехгранных вогнутых структур / А.Б. Борзов [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15. № 7. С. 27–40.

14. Обнаружение групповой воздушной цели по угловому шуму / Н.С. Акиншин, Э.А. Амирбеков, Р.П. Быстров, А.В. Хомяков // Радиотехника, 2014. № 12. С. 70–76.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Акиншин Руслан Николаевич, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник СПП РАН, rakinshin@yandex.ru.

Бортников Андрей Александрович, ведущий инженер АО «ЦКБА», cdbae@cdbae.ru.

Цыбин Станислав Михайлович, ведущий инженер АО «ЦКБА», cdbae@cdbae.ru.

Мамон Юрий Иванович, доктор технических наук, главный специалист АО «ЦКБА», cdbae@cdbae.ru.

Минаков Евгений Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор Тульского государственного университета, EMinakov@bk.ru.

MODEL AND ALGORITHM FOR CALCULATION OF THE RADAR SIMULATOR OBJECT EFFECTIVE SQUARE OF SCATTERING

**Ruslan N. Akinshin¹, Andrey A. Bortnikov²,
Stanislav M. Tsibin², Yuri I. Mamon², Evgenii I. Minakov³**

¹SSP RAS, Moscow, Russia

²CDBAE, Tula, Russia

³Tula state University, Tula, Russia

ABSTRACT

To reduce the cost of field tests of the ballistic objects (BO) simulators reflection properties, it is advisable to develop a model and algorithm for calculation of the radar objects effective surface scattering. As a simulator of ballistic objects a complex radar reflector, made of a lossfree dielectric is chosen. It looks like a spherical Luneburg lens with a coating of high-conductivity alloy as well as a truncated cone, disk, and cylindrical elements. The stages of aperture version of reflection from the inner surface of the Luneburg lens are proposed. A physical model of the reflection on the elements of design and the technique of modeling with a calculation algorithm of the effective surface scattering are developed. The algorithm of calculation of the ballistic objects resonance effective surface scattering is worked out. This algorithm is presented in a graphical form. The interface of the computing complex is presented. As a simulator of ballistic object we selected a complex radar reflector, made of a lossfree dielectric sphere with a coating of high-conductivity alloy as well as of a truncated cone, disk, and cylindrical elements. The comparative indicatrices of ballistic objects simulator are presented. The conclusion on the comparative analysis of the results of measurements in situ and modeling results is made. The examples of numerical calculations of the ESR of the head part of the BO simulator with increased ESR and increased all-aspect view are given. The options of the BO simulator head parts with increased ESR and increased all-aspect view with optimal placement of radar dielectric reflector and a corner unit with sectional placement of dielectric reflectors are analyzed.

Key words: effective surface scattering, ballistic object, radar reflector.

REFERENCES

1. *Radioelektronnye sistemy. Osnovy postroeniya. Spravochnik* [Radio electronic systems. Fundamentals of construction and theory. Handbook ed. Ya.D. Shirman]. M., Joint-Stock Company "Makvis", 1998, 825 p. (in Russian)

2. **Stager E.A.** *Rasseyanie radiovoln na telach slozhnoy formy* [Scattering of radio waves on bodies of complex shape]. M., Radio and Communication, 1986, 183 p. (in Russian)
3. **Makarovets N.A., Sebyakin A.Yu.** *Izmerenie effektivnoy ploschadi rasseyaniya golovnoy chasti imitatora vozduшной tseli* [Measurement of the effective scattering area of the head part of the air target simulator]. [Collection of theses of the reports of the XXIV scientific session dedicated to Radio Day]. Tula, Tula State University, 2006, pp. 176–179. (in Russian)
4. **Sullivan D.M.** *Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method*. NY, IEEE Press, 2000, 165 p.
5. **Taflove A., Hagness S.** *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*. NY, Artech House, 2000, 467 p.
6. **Gibson D.** *The Method of Moments in Electromagnetics*. NY, Chapman & Hall CRC, 2008, 594 p.
7. **Ufimtsev P.Ya.** *Osnovy fizicheskoy teorii difraktsii* [Fundamentals of the physical theory of diffraction]. M., Binom, 2009, 352 p. (in Russian)
8. *Millimetrovaya radiolokatsiya: metody obnaruzheniya i navedeniya v usloviyah estestvennykh i organizovannykh pomekh* [Millimeter radar: methods of detection and guidance in conditions of natural and organized interference]. A.B. Borzov [and others]. M., Radiotekhnika, 2010, 376 p. (in Russian)
9. *Metody sinteza geometricheskikh modeley slozhnykh radiolokatsionnykh ob'ektov* [Methods of synthesis of geometric models of complex radar objects]. A.B. Borzov [and others]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems], 2003, № 5, pp. 55–63. (in Russian)
10. **Antifeyev V.N., Borzov A.B., Suchkov V.B.** *Fizicheskie modeli radiolokatsionnykh poley rasseyaniya ob'ektov slozhnoy formy* [Physical models of the radar fields of scattering of objects of complex shape]. M., MSTU n. N.E. Bauman, 2003, 61 p. (in Russian)
11. **Kobak V.O.** *Radiolokatsionnye otrazhateli* [Radiolocation convolutions]. M., Soviet radio, 1975, 244 p. (in Russian)
12. **Maisels E.N., Torgovanov V.A.** *Izmerenie harakteristik rasseyaniya radiolokatsionnykh tseley* [Measurement of the characteristics of the scattering of radiolocation targets]. M., Soviet radio, 1972, 232 p. (in Russian)
13. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya polarizatsionnykh harakteristik dvugrannykh struktur* [Theoretical and experimental studies of the polarization characteristics of dihedral and trihedral concave structures]. Borzov A.B. [and others]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic waves and electronic systems, 2010, Vol. 15, no. 7, pp. 27–40.
14. **Akinshin N.S., Amirbekov E.A., Bystrov R.P., Khomyakov A.V.** *Obnaruzhenie gruppovoy vozduшной tseli po uglovomu shumy* [Detection of a group air target for angular noise]. *Radiotekhnika* [Journal of Radio Engineering], 2014, no. 12, pp.70–76. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ruslan N. Akinshin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of SPP of RAS, rakinshin@yandex.ru.

Andrey A. Bortnikov, Leading Engineer of JSC TsKBA, cdbae@cdbae.ru.

Stanislav M. Tsibin, Leading Engineer of JSC TsKBA, cdbae@cdbae.ru.

Yury I. Mamon, Doctor of Technical Sciences, Chief Specialist of JSC TsKBA, cdbae@cdbae.ru.

Evgeny I. Minakov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Tula State University, EMinakov@bk.ru.

Поступила в редакцию 11.08.2017
Принята в печать 23.11.2017

Received 11.08.2017
Accepted for publication 23.11.2017