

РАСЧЕТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НАДУВНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛИГОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ

О. И. СУХАРЕВСКИЙ, В. Р. ХАЧАТУРОВ, Г. С. ЗАЛЕВСКИЙ, И. Е. РЯПОЛОВ

Рассматривается надувное диэлектрическое подъемно-поворотное устройство для полигонных измерений эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) радиолокационных объектов. Предложен численный метод, основанный на приближении физической оптики, предназначенный для расчета электромагнитного рассеяния рассматриваемой диэлектрической оболочки, составленной из торов больших электрических размеров. Приведены результаты расчета ее ЭПР в сантиметровом диапазоне длин волн. Обсуждаются технические решения по снижению уровня вторичного излучения подъемно-поворотного устройства.

Ключевые слова: диэлектрическая оболочка, полигонные измерения, физическая оптика, эффективная поверхность рассеяния.

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения радиолокационной заметности воздушных объектов необходимо располагать средствами получения информации об их характеристиках вторичного излучения. Несмотря на интенсивное развитие электродинамических методов расчета указанных характеристик [1-8], возможности которых растут параллельно с возможностями компьютеров, созданные на данный момент методы моделирования не могут заменить физические измерения, особенно если это касается реальных объектов сложной формы. Проведение физических измерений крайне важно в том числе для проверки и совершенствования методов расчета.

В настоящий момент из всего многообразия известных методов [1, 3, 9, 10] наибольшее распространение получили:

- полигонные измерения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) реальных объектов (в частности измерительные системы 2 ЦНИИ МО, Россия; MVG Microwave Vision Group [11], Howland Company [12], США);

- измерения ЭПР масштабных моделей в безэховых камерах [11-14].

Очевидно, полигонные измерения являются более естественными. ЭПР реальных объектов изменяется в широком динамическом диапазоне. Поэтому для выполнения прецизионных измерений к соответствующей аппаратуре предъявляются очень высокие требования [3, 9]. Кроме того, в полигонных системах очень важно обеспечить условие облучения объекта в дальней зоне, максимально снизить влияние подстилающей поверхности и уменьшить уровень вторичного излучения подъемно-поворотного устройства (ППУ), на котором крепится объект. В качестве таких креплений используются малоотражающие колонны (пилоны) [3, 9, 11, 12] или шнуры [3, 9]. Для снижения отражающих свойств ППУ могут использоваться радиопоглощающие материалы.

Для измерений ЭПР объектов сравнительно большого веса в качестве ППУ может быть предложена надувная тонкая диэлектрическая оболочка (ТДО). К основным ее достоинствам можно отнести небольшой вес, сравнительную простоту подъема и установки объекта, а также мобильность. Целью настоящей статьи является предварительная оценка уровня вторичного излучения такого ППУ. Для этого создан метод расчета, предназначенный для расчета ЭПР устройства, представляющего собой конструкцию, составленную из торов больших электрических размеров в виде электрически тонких диэлектрических оболочек, заполненных воздухом. Разработанный метод основывается на положениях физической оптики [3, 4, 6, 7]. Приводятся результаты расчета ЭПР ППУ в сантиметровом диапазоне длин волн. Такая предварительная оценка имеет важное практическое значение для определения всего комплекса необходимых технических мероприятий по снижению уровня обратного рассеяния предложенного ППУ.

1. МЕТОД РАСЧЕТА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ТОНКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ БОЛЬШИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ

Рассмотрим объект, представляющий собой тонкую диэлектрическую оболочку с толщиной стенки δ (рис. 1). Объект расположен в свободном пространстве с относительными диэлектрической ϵ и магнитной проницаемостями μ , равными единице. Той же средой оболочка заполнена внутри. Относительная диэлектрическая проницаемость материала оболочки $\epsilon_{об} = \epsilon'_{об} + j\epsilon''_{об}$, а ее относительная магнитная проницаемость $\mu_{об} = 1$. Характерные геометрические размеры оболочки много больше длины волны. Кроме того, отдельные элементы оболочки характеризуются малыми кривизнами (объект гладкий).

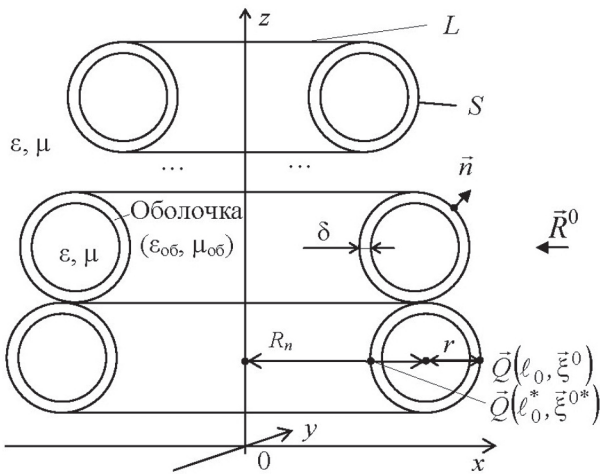


Рис. 1. Сечение модели надувной ТДО

Будем исходить из интегрального представления типа Стреттона-Чу [3, 15, 16] для электромагнитного поля (ЭМП), рассеянного произвольным диэлектрическим объектом больших электрических размеров (в дальней зоне при со-вмещенном приеме):

$$\vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) \approx -jk_0 \frac{\exp(jk_0 D)}{D} \times \int_S \left[(\vec{J}^e \times \vec{p}) \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \vec{J}^m (\vec{p} \times \vec{R}^0) \right] \times \exp(jk_0 (\vec{R}^0 \cdot \vec{Q})) ds_Q, \quad (1)$$

где \vec{p} – орт поляризации приемной антенны; \vec{E}^s – напряженность электрического поля, рассеянного объектом; \vec{R}^0 – единичный вектор, указывающий направление облучения (приема); $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число в свободном пространстве; λ_0 – длина зондирующей волны; D – расстояние от центра объекта до точки приема; $\vec{J}^e = (\vec{n} \times \vec{H}')$, $\vec{J}^m = (\vec{n} \times \vec{E}')$ – плотности эквивалентных электрического и магнитного тока на поверхности объекта S ; \vec{E}' , \vec{H}' – напряженности соответственно электрического и магнитного поля на поверхности объекта S ; \vec{n} – внешняя к S нормаль; ϵ_0 , μ_0 – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума соответственно; \vec{Q} – точка на поверхности S .

Будем далее предполагать, что основной вклад в рассеяние в обратном направлении внесит непосредственное отражение от «освещенной» внешней поверхности оболочки. Поле же, пришедшее внутрь оболочки и переотразившееся от внутренней поверхности оболочки, существенно теряет в энергетике и дает эффекты второго порядка малости. Таким образом, из соотношения (1) можно получить в приближении Кирхгофа [4] выражение:

$$\vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) \approx -jk_0 \frac{\exp(jk_0 D)}{D} \int_{S_{\text{осв}}} \left[\vec{p} \cdot (\vec{n} \times \vec{H}'(\vec{Q})) + \vec{E}'(\vec{x}) (\vec{n} \times (\vec{p} \times \vec{R}^0)) \right] \exp(jk_0 (\vec{R}^0 \cdot \vec{Q})) ds_Q. \quad (2)$$

Вектор поляризации \vec{p} может быть разложен в каждой точке поверхности S на две ортогональные составляющие p_{\perp} и p_{\parallel} :

$$\vec{p} = p_{\perp} \vec{e}_{\perp}^0 + p_{\parallel} (\vec{R}^0 \times \vec{e}_{\perp}^0).$$

Поле \vec{E}' , \vec{H}' на (вблизи) поверхности в приближении Кирхгофа может быть представлено в виде:

$$\vec{E}'(\vec{Q}) = \left[\rho_{\perp}(\vec{Q}) p_{\perp}(\vec{Q}) \vec{e}_{\perp}^1 + \rho_{\parallel}(\vec{Q}) p_{\parallel}(\vec{Q}) \vec{e}_{\parallel}^1 \right] \times \exp(jk_0 (\vec{R}^1 \cdot \vec{Q})), \quad (3)$$

$$\vec{H}'(\vec{x}) = \frac{1}{j\omega\mu_0} \nabla \times \vec{E}'(\vec{Q}), \quad (4)$$

где ρ_{\perp} , ρ_{\parallel} – коэффициенты отражения для волн двух рассматриваемых поляризаций;

$$\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - 2\vec{n}(\vec{R}^0 \cdot \vec{n});$$

$$\vec{e}_{\perp}^m = \frac{\vec{R}^m \times \vec{n}}{|\vec{R}^m \times \vec{n}|}, \quad (m=0, 1);$$

$$\vec{e}_{\parallel}^m = (\vec{R}^m \times \vec{e}_{\perp}^m).$$

Далее сделаем еще одно предположение, обычно используемое в приближении Кирхгофа [4]. Учитывая большие электрические размеры и малые кривизны объекта, поле в точке \vec{Q} на поверхности S будем считать таким же, как на подстроенном эквидистантном касательном слое, толщиной δ . Поэтому для локального слоя, соответствующего точке \vec{Q} , величины ρ_{\perp} , ρ_{\parallel} являются постоянными и могут быть вычисленными по формуле:

$$\rho_{\perp, \parallel} = \frac{j(c^2 - 1) \sin(k_{\text{осв}} \delta)}{2c \cos(k_{\text{осв}} \delta) - j(c^2 + 1) \sin(k_{\text{осв}} \delta)},$$

где $c = \frac{\sqrt{\epsilon_{\text{осв}} - \sin^2(\theta)}}{\beta \cos(\theta)}$; θ – угол падения;

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{для } \rho_{\perp}, \\ \epsilon_{\text{осв}}, & \text{для } \rho_{\parallel}; \end{cases} \quad \cos(\theta) = |\vec{R}^0 \cdot \vec{n}|;$$

$$\sin^2(\theta) = 1 - (\vec{R}^0 \cdot \vec{n})^2; \quad k_{\text{осв}} = k_0 \sqrt{\epsilon_{\text{осв}} - \sin^2(\theta)}.$$

Подставив выражения (3), (4) в (2), после несложных выкладок получим:

$$\vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) \approx -jk_0 \frac{\exp(jk_0 D)}{4\pi D} \times \int_{S_{\text{осв}}} \left[\rho_{\perp}(\vec{Q}) p_{\perp}^2(\vec{Q}) - \rho_{\parallel}(\vec{Q}) p_{\parallel}^2(\vec{Q}) \right] (\vec{R}^0 \cdot \vec{n}) \times \exp(2jk_0 (\vec{R}^0 \cdot \vec{Q})) ds_Q = -2jk_0 \frac{\exp(jk_0 D)}{4\pi D} I(\vec{R}^0). \quad (5)$$

В соотношении (5) учтено, что $(\vec{R}^1 \cdot \vec{Q})|_S = (\vec{R}^0 \cdot \vec{Q})|_S$ вследствие того, что поле в каждой точке поверхности оболочки предполагается равным полю на подстроенном плоскопараллельном слое, а $\vec{R}^1 = \vec{R}^0 - 2\vec{n}(\vec{R}^0 \cdot \vec{n})$.

Введем систему координат так, чтобы ось Oz была направлена вдоль оси конструкции. Основным элементом ТДО является тор, «надевший» на ось Oz (рис. 1). Рассмотрим рассеяние на таком торе. Обозначим через R_n большой радиус n -го тора ($n=1, 7$), r – радиус сечения тора. Запишем двойной интеграл $I(\vec{R}^0)$ в виде повторного:

$$I(\vec{R}^0) = \int_L \exp(2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{Q}(\ell))) M(\ell) d\ell, \quad (6)$$

где

$$M(\ell) = \int_{S_0} \exp(2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{Q}(\xi))) \left[\rho_{\perp}(\vec{Q}(\xi)) \rho_{\perp}^2(\vec{Q}(\xi)) - \rho_{\parallel}(\vec{Q}(\xi)) \rho_{\parallel}^2(\vec{Q}(\xi)) \right] (\vec{R}^0 \cdot \vec{n}) ds_{\xi}, \quad (7)$$

$ds_{\xi} = r_0 d\varphi$ – элемент дуги; S_0 – освещенная часть сечения тора, перпендикулярного контуру L (центральной линии тора); r_0, φ – полярные координаты в сечении S_0 .

Учитывая, что $R_n, r \gg 1$, можно, последовательно применяя метод стационарной фазы [6] к интегралам (6), (7), получить:

$$I(\vec{R}^0) \approx \exp\left(2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{Q}(\ell_0)) + j\frac{\pi}{4}\right) \times M(\ell_0) \sqrt{\frac{\pi}{k_0 \chi(\ell_0) |\vec{R}^0 \cdot \vec{v}(\ell_0)|}},$$

где ℓ_0 – точка на линии L , ближайшая к точке наблюдения, т. е. $\vec{R}^0 \cdot \vec{Q}(\ell_0) = -R_n$; $\chi(\ell_0) = \frac{1}{R_n}$ – кривизна кривой L в точке ℓ_0 ; $\vec{v}(\ell_0)$ – орт главной нормали в точке ℓ_0 , т. е. $|\vec{R}^0 \cdot \vec{v}(\ell_0)| = 1$;

$$M(\ell_0) \approx \exp\left(2jk_0(\vec{R}^0 \cdot \vec{\xi}^0) + j\frac{\pi}{4}\right) \times \rho(\vec{R}^0 \cdot \vec{n}^0) \sqrt{\frac{\pi}{k_0 \chi_1(\vec{\xi}^0) |\vec{R}^0 \cdot \vec{v}(\vec{\xi}^0)|}};$$

$\vec{\xi}^0$ – радиус-вектор точки на сечении S_0 , соответствующий точке ℓ_0 на кривой L , в системе координат с центром в т. ℓ_0 на L ; $\chi_1(\vec{\xi}^0) = \frac{1}{r}$ – кривизна сечения S_0 ; $|\vec{R}^0 \cdot \vec{v}(\vec{\xi}^0)| = 1$.

Таким образом, $(\vec{R}^0 \cdot \vec{\xi}^0) = -r$, $(\vec{R}^0 \cdot \vec{n}^0) = -1$. Кроме того, учитывая, что в точке $(\vec{\xi}^0, \ell_0)$ подстроенный плоскопараллельный слой ортогонален к \vec{R}^0 (т. е. $\theta=0$) [5],

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{\perp}(0) = -\rho_{\parallel}(0) = \\ &= \frac{j(\varepsilon_{06} - 1) \sin(k_{06} \delta)}{2\sqrt{\varepsilon_{06}} \cos(k_{06} \delta) - j(\varepsilon_{06} + 1) \sin(k_{06} \delta)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Объединяя формулы (6) – (8), окончательно получим:

$$I(\vec{R}^0) \approx -\frac{j\pi\rho}{k_0} \sqrt{R_n r} \exp(-2jk_0(R_n + r)), \quad (9)$$

и, следовательно,

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) &\approx -\frac{\exp(jk_0 D)}{2D} \rho \sqrt{R_n r} \times \\ &\times \exp(-2jk_0(R_n + r)), \end{aligned} \quad (10)$$

а ЭПР тора

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \lim_{D \rightarrow \infty} 4\pi D^2 |\vec{p} \cdot \vec{E}^s|^2 \approx \\ &\approx 4\pi D^2 \frac{1}{4D^2} \rho^2 R_n r \approx \pi \rho^2 R_n r. \end{aligned} \quad (11)$$

В случае ТДО – конструкции, состоящей из N торов с различными большими радиусами:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) &\approx -\frac{\exp(jk_0 D)}{2D} \times \\ &\times \rho \sum_{n=1}^N \sqrt{R_n r} \exp(-2jk_0(R_n + r)), \end{aligned} \quad (12)$$

а ЭПР:

$$\sigma_{\text{ТДО}} \approx \pi \left| \rho \sum_{n=1}^N \sqrt{R_n r} \exp(-2jk_0(R_n + r)) \right|^2. \quad (13)$$

В выражении (12) в показателе экспоненты стоит величина $R_n + r$ – расстояние от оси Oz до ближайшей к приемнику точки n -го тора. Таким образом, ЭПР ТДО вычисляется по сумме ЭМП, рассеянных отдельными торами, с учетом их фаз.

Формула (12) получена в предположении, что ЭМП, прошедшее внутрь тора, не вносит вклад в ЭПР всего объекта. Эта формула может быть уточнена за счет учета вклада отражения от «задней» (внутренней) поверхности тора. При этом так же, как и в случае отражения от «освещенной» поверхности тора, основной вклад будет давать точка стационарной фазы на внутренней поверхности тора ($\ell_0^*, \vec{\xi}^{0*}$), диаметрально противоположная «блестящей точке» на «освещенной» поверхности. Таким образом, в этой точке $\vec{R}^0 \cdot \vec{Q}(\ell_0^*) = -R_n$, $\vec{R}^0 \cdot \vec{\xi}^{0*} = r$. При этом необходимо учитывать, что точка стационарной фазы на внутренней поверхности тора гиперболического типа, что приводит к появлению множителя $-j$ в соответствующем члене [17]. Учитывая, что поле, попавшее на внутреннюю поверхность тора, ослаблено в результате прохождения в обратном направлении, в дополнительном слагаемом в формуле (10) необходимо заменить $\rho \rightarrow \tau^2 \rho$, $\exp(-2jk_0(R_n + r)) \rightarrow \exp(-2jk_0(R_n - r))$. Тогда формулы (12) и (13) с учетом характера кривизны внутренней поверхности в окрестности точки ($\ell_0^*, \vec{\xi}^{0*}$) [17] приобретают вид:

$$\begin{aligned} \vec{p} \cdot \vec{E}^s(\vec{R}^0) &\approx -\frac{\exp(jk_0 D)}{2D} \rho \sum_{n=1}^N \exp(-2jk_0 R_n) \times \\ &\times \sqrt{R_n r} \left[\exp(-2jk_0 r) - j\tau^2 \exp(2jk_0 r) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ТДО}} &\approx \pi \left| \rho \sum_{n=1}^N \exp(-2jk_0 R_n) \sqrt{R_n r} \times \right. \\ &\times \left. \left[\exp(-2jk_0 r) - j\tau^2 \exp(2jk_0 r) \right] \right|^2. \end{aligned} \quad (15)$$

В формулах (14), (15) комплексный коэффициент прохождения τ имеет вид [6]:

$$\tau = \exp(-jk_0\delta) \left[\cos(k_{об}\delta) + \frac{j}{\sqrt{\epsilon_{об}}} \sin(k_{об}\delta) + \rho \left(\cos(k_{об}\delta) - \frac{j}{\sqrt{\epsilon_{об}}} \sin(k_{об}\delta) \right) \right],$$

где ρ определяется формулой (8).

Формула (15) представляет собой уточненную формулу ЭПР ТДО, учитывающая волны:

- отразившуюся от «освещенной» поверхности оболочки;
- прошедшую внутрь оболочки, отразившуюся от задней стенки.

В следующем подразделе приводятся результаты вычислений ЭПР рассматриваемого ППУ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ НАДУВНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

С помощью разработанного в первом разделе метода проведены расчеты ЭПР ППУ, представленного на рис. 2. ППУ состоит из силовой установки, состоящей из 7 торов (ТДО1) и устройства для дискретного изменения угла места исследуемого объекта (ТДО2), представляющего собой такую же надувную конструкцию (что и основная), состоящую из секторов торов. Угол места объекта может изменяться путем надувания (сдувания) определенного числа секций.

При расчетах принято, что направлению на подвижную колесную платформу соответствует ноль главного лепестка диаграммы направленности (ДН) совмещенной антенны. Максимум ДН антенны соответствует направлению, перпендикулярному оси ТДО. Этому направлению соответствует линия, проведенная на высоте $z = h_{max} = 19$ м. Ширина ДН по полю на уровне «0,707» составляла $\Delta\epsilon_{0,707} \approx 0,89^\circ$. Нижнему краю ППУ соответствует $z = 0$.

Геометрические параметры ТДО1 следующие:

- высота ТДО1 $h_1 = 8,2337$ м;
- малый диаметр блока $d_1 = 1,176$ м (радиус $r = r_1 = 0,588$ м, рис. 1).
- радиус блоков по высоте задавался следующим образом (рис. 1):

$$R_n = R_{\text{ТДО1 } n} = R_{\text{ТДО1 } 1} + \Delta_1(n-1), \quad (16)$$

где $n = \overline{1, N}$ – номер блока (верхний блок – $n = 1$), $N = 7$ – количество блоков в ТДО1; $\Delta_1 = 0,26$;

- внешний диаметр верхнего блока

$$D_{\text{min ТДО1}} = 2(R_{\text{ТДО1 } 1} + r_1) = 5,82 \text{ м};$$

- внешний диаметр нижнего блока

$$D_{\text{max ТДО1}} = 2(R_{\text{ТДО1 } 7} + r_1) = 8,9375 \text{ м}.$$

Геометрические параметры ТДО2:

- высота блоков: $h = 1,668$ м;

- малый диаметр блока (сектора тора, рис. 2) $d_2 = 0,417$ м (радиус $r = r_2 = 0,208$ м);
- радиус кривизны блоков

$$R_n = R_{\text{ТДО2 } n} = R_{\text{ТДО2 } 1} + \Delta_2(n-1), \quad (17)$$

где $R_{\text{ТДО2 } 1} + n = \overline{1, 4}$, $\Delta_2 = 0,087$;

$$R_{\text{min ТДО2}} = 2(R_{\text{ТДО2 } 1} + r_2) = 2,65 \text{ м};$$

$$R_{\text{max ТДО2}} = 2(R_{\text{ТДО2 } 4} + r_2) = 2,91 \text{ м}.$$

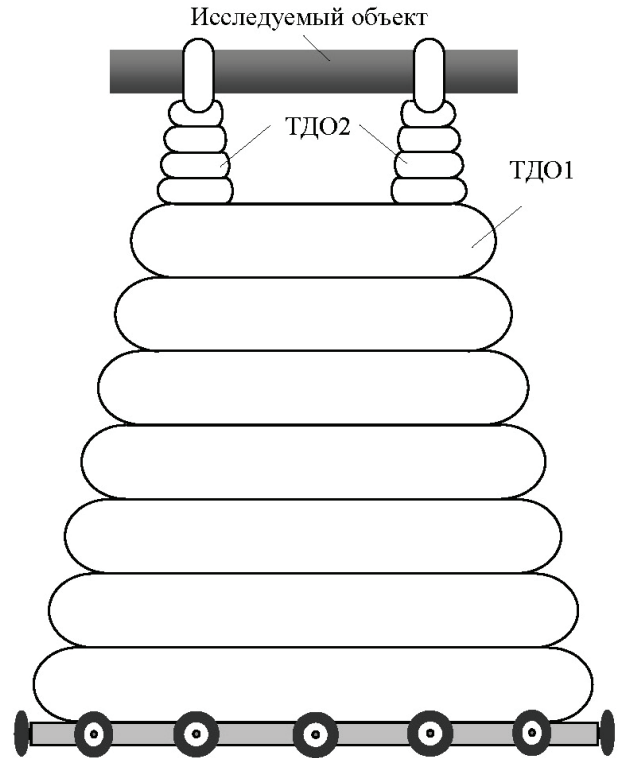


Рис. 2. Модель ППУ для измерения ЭПР объекта

В качестве примера выбрана оболочка из материала ТЕ62 с толщиной стенки $\delta = 5 \times 10^{-4}$ м. Измеренное значение вещественной диэлектрической проницаемости материала оболочки составляет $\epsilon'_{об} = 2,5$, тангенс угла потерь $\frac{\epsilon''_{об}}{\epsilon'_{об}} = 0,05$.

На изделие падает неоднородная плоская волна. Распределение амплитуды падающего поля показано на рис. 3.

В качестве амплитудного распределения падающего на объект поля от высоты z использована функция:

$$F(z) = F(\epsilon_{дн}) = \frac{\sin\left(\frac{\pi L_\epsilon}{\lambda_0} \sin(\epsilon_{дн})\right)}{\frac{\pi L_\epsilon}{\lambda_0} \sin(\epsilon_{дн})},$$

где $\epsilon_{дн} = \arctg\left(\frac{z}{D}\right)$; D – расстояние от геометрического центра антенны до оси ТДО1

(при $\lambda_0 = 0,03$ м – $D = 1100$ м; при $\lambda_0 = 0,06$ м – $D = 750$ м); $L_\epsilon = 18,3$ м (высота, соответствующая максимуму ДН антенны, минус высота колесной подставки, равная 0,7 м).

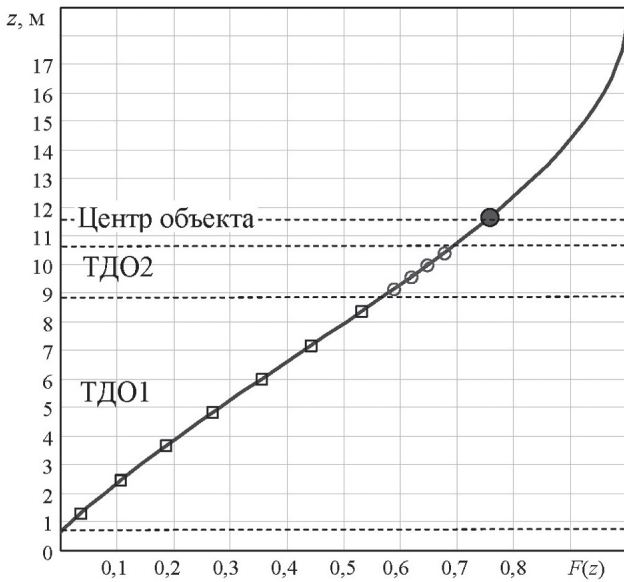


Рис. 3. Распределение амплитуды падающего поля по высоте

Приближенно зависимость падающего поля от высоты можно заменить ступенчатой функцией со ступенькой, равной диаметру сечения тора (малому диаметру). В этом случае следует использовать понятие обобщенной ЭПР для случая падающей неоднородной плоской волны. Такую обобщенную ЭПР удобно сравнивать с соответствующей обобщенной ЭПР исследуемого объекта с учетом амплитуды падающего на него поля. Выражение для обобщенной ЭПР ТДО имеет следующий вид:

$$\sigma_{\text{ТДО1(2)}} \approx \pi \left| \rho \sum_{n=1}^N \exp(-2jk_0 R_n) F_n \sqrt{R_n r} \times \left(\exp(-2jk_0 r) - j\tau^2 \exp(2jk_0 r) \right) \right|^2, \quad (18)$$

где F_n – ступенчатая функция распределения амплитуды падающего ЭМП.

Разность в квадратных скобках под знаком суммы в формуле (18) показывает, что $\sigma_{\text{ТДО1}}$ и $\sigma_{\text{ТДО2}}$ флюктуируют при изменении показателей экспонент, в частности при изменении радиуса сечения тора или частоты зондирования. Далее приводятся результаты расчета обобщенной ЭПР ТДО1 при $r = 0,588 \pm 0,01$ м и предлагается в качестве оценки $\sigma_{\text{ТДО1}}$ использовать максимальное значение, полученное при изменении радиуса сечения торов в указанном диапазоне.

Значение обобщенной ЭПР ТДО1 составило:

$$\sigma_{\text{ТДО1}} = 0,010 \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,03 \text{ м};$$

$$\sigma_{\text{ТДО1}} = 2,489 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,06 \text{ м}.$$

При расчете обобщенной ЭПР ТДО2 также проведены вычисления для диапазона изменения радиуса сечения тора $r = 0,208 \pm 0,01$ м.

Значение обобщенной ЭПР $\sigma_{\text{ТДО2}}$ составило:

$$\sigma_{\text{ТДО2}} = 4,69 \times 10^{-3} \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,03 \text{ м};$$

$$\sigma_{\text{ТДО2}} = 0,034 \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,06 \text{ м}.$$

Величина $\sigma_{\text{ТДО2}}$ может превышать $\sigma_{\text{ТДО1}}$ в связи с тем, что верхняя оболочка облучается волной большей амплитуды (рис. 3)

При расчете ЭМП, отраженного полной системой надувных блоков (ТДО1 и ТДО2), за значение $\sigma_{\text{ППУ}}$ принято максимальное значение ЭПР, соответствующее сумме ЭМП, рассеянного ТДО1 при изменении радиуса сечения большого тора $r = 0,588 \pm 0,01$ м, и поля, рассеянного элементами ТДО2, при радиусе сечения торов $r_2 = 0,212$ м, при котором наблюдается максимальное значение ЭПР ТДО2 ($\sigma_{\text{ТДО2}} = 4,69 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ при $\lambda_0 = 0,03$ м; $\sigma_{\text{ТДО2}} = 0,034 \text{ м}^2$ при $\lambda_0 = 0,06$ м). Значение обобщенной ЭПР полной системы (ТДО1+ТДО2) составило:

$$\sigma_{\text{ППУ}} = 0,025 \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,03 \text{ м};$$

$$\sigma_{\text{ППУ}} = 0,049 \text{ м}^2 \text{ при } \lambda_0 = 0,06 \text{ м}.$$

С целью недопущения синфазного сложения ЭМП, рассеянного отдельными сегментами в обратном направлении, размеры торов (их радиусы кривизн) следует выбирать разными. Проведенные вычисления показывают, что для снижения уровня обратного рассеяния рассматриваемой ППУ величину Δ_1 в формуле (16) следует выбирать в диапазоне 0,25...0,29, а величину Δ_2 в (17) равной 0,085...0,09.

3. МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ ПАРАЗИТНОГО РАССЕЯНИЯ ОТ ПОДЪЕМНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

ППУ целесообразно применять для измерений ЭПР объектов, превышающих ЭПР используемого ППУ. Предварительные вычисления, проведенные в предыдущем разделе, показали, что обобщенная ЭПР рассмотренного диэлектрического ППУ может достигать величины $\sigma_{\text{ППУ}} = 0,025 \text{ м}^2$ при $\lambda_0 = 0,03$ м ($\sigma_{\text{ППУ}} = 0,049 \text{ м}^2$ при $\lambda_0 = 0,06$ м). На этапе разработки измерительного стенда могут быть применены следующие технические решения по снижению указанного паразитного рассеяния.

1. Покрытие радиопоглощающим гибким материалом устройства дискретного изменения угла места объекта (ТДО2) и нижнего каркаса ППУ с колесами (рис. 2) с помощью специальной ширмы.

2. В измерительном комплексе предлагается использовать пространственные методы компенсации паразитного рассеяния от нижней части ППУ, путем ввода в антенну дополнительного облучателя, максимум ДН которого будет направлен в нижнюю часть ППУ. Далее паразитные колебания, принятые дополнительной антенной, когерентно вычитаются из результирующего сигнала основной антенны.

3. Измерение паразитного рассеяния от ППУ при отсутствии объекта, запоминание его и дальнейшее вычитание в ЭВМ измерительного комплекса из результирующей ЭПР при проведении измерений.

4. Моделирование обратного рассеяния от ППУ показало, что при изменении частоты зондирующего сигнала даже в небольших пределах величина паразитного рассеяния значительно изменяется. Поэтому перед проведением измерений, при отсутствии объекта измерения, подбирается частота, на которой уровень обратного паразитного рассеяния минимален.

Перечисленные методы позволяют дополнительно уменьшить уровень обратного рассеяния от ППУ на 16...20 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрено ППУ для полигонных измерений характеристик рассеяния радиолокационных объектов. В качестве такого устройства предложено использовать надувную ТДО. В работе проведена предварительная оценка уровня вторичного излучения предложенного ППУ. Для этого разработан численный метод расчета обратного рассеяния ТДО, состоящей из торов больших электрических размеров. Метод основан на приближении физической оптики. При этом учитывается, что ППУ и исследуемый объект облучаются плоской неоднородной волной.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что интенсивность рассеяния рассмотренной диэлектрической оболочки существенно зависит от частоты облучения. Результаты показывают, что ЭПР рассмотренной ТДО может достигать сотых долей квадратного метра. В статье предложен комплекс технических решений для дополнительного снижения уровня паразитного обратного рассеяния рассмотренного ППУ.

Литература

- [1] Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section, 2nd Edition. — Raleigh, NC: SciTech Publishing, Inc, 2004. — 653 p.
- [2] Shirman Ya. D. et. al. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering Recognition, Detection and Tracking, Ya. D. Shirman (ed). — Norwood, M.A.: Artech House, 2002. — 382 p.
- [3] Львова Л. А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. — Снежинск: Изд-во РФЯЦ — ВНИИТФ, 2003. — 232 с.
- [4] Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике. — М.: Бином, 2007. — 366 с.
- [5] Gibson W. C. The Method of Moments in Electromagnetics. — Boca Raton London New York: Chapman & Hall / Taylor & Francis Group, 2008. — 288 p.
- [6] 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.: ХУ ВС, 2009. — 468 с.
- [7] Ultrawideband Radar. Application and Design / J. D. Taylor, O. I. Sukharevsky, V. A. Vasilets and others // Edited by James D. Taylor. — Boca Raton, London, New York: SRC Press Taylor & Francis Groupe, 2012. — 520 p.
- [8] Залевский Г. С., Василец В. А., Сухаревский О. И. Радиолокационные дальностные портреты крылатых ракет в различных диапазонах длин волн // При-

кладная радиоэлектроника. — 2014. — Т. 13, № 1. — С. 20-28.

- [9] Майзельс Е. Н., Торгованов В. А. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. Под ред. М. А. Колосова. — М.: Сов. радио, 1972. — 232 с.
- [10] Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: Радиотехника, 2007. — 512 с.
- [11] MVG Microwave Vision Group. Solutions for Aerospace and Defense. — Режим доступа: <http://www.microwavevision.com/panels/industries/aerospace-defense>.
- [12] The Howland Company. Radar Cross-Section (RCS) Range Design & Evaluation. — Режим доступа: http://www.thehowlandcompany.com/radar_stealth/RCS-ranges.htm.
- [13] Damaskos, Inc. Material Measurement Solution. Anechoic Chamber. — Режим доступа: <http://www.damaskosinc.com/products.htm>.
- [14] Каменский Э. Ф., Леонов И. Г., Максютя Д. В., Наконечный В. С., Нечитайло С. В., Орехов С. В., Побережный А. А. Безэховая камера СВЧ сантиметрового диапазона и методика определения ее основных характеристик // Сборник научных трудов Харьковского военного университета. — 2000, № 4(30). — С. 72-78.
- [15] Антенны сантиметровых волн / Пер. с англ. под ред. Фельда Я. Н. — М.: Советское радио, 1950. — 319 с.
- [16] Дмитриев В. И., Захаров Е. В. Интегральные уравнения в краевых задачах электродинамики: Учеб. пособие. — М.: МГУ, 1987. — 167 с.
- [17] Федорюк М. В. Асимптотика: интегралы и ряды. — М.: Наука, 1987. — 544 с.

Поступила в редколлегию 24.04.2014



Сухаревский Олег Ильич, Заслуженный деятель науки и техники Украины, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: электродинамика, теория дифракции электромагнитных волн.



Хачатуров Валерий Рубенович, кандидат технических наук, доцент, директор Государственного предприятия «Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники». Научные интересы: теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех.



Залевский Геннадий Станиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, докторант Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Научные интересы: методы расчета характеристик вторичного излучения радиолокационных объектов и их исполь-

зовані в інтересах розширення інформаційних можливостей радіолокаційних систем різного призначення.



Ряполов Иван Евгеньевич, науковий співробітник Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. Наукові інтереси: моделювання вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів з низькою відбивною здатністю.

УДК 621.396.96

Розрахунок зворотного розсіювання надувного діелектричного підйомно-поворотного пристрою для полігонних вимірювань характеристик розсіювання радіолокаційних об'єктів / О. І. Сухаревський, В. Р. Хачатуров, Г. С. Залевський, І. Є. Ряполов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2014. – Том 13. № 2. – С. 112–118.

Розглядається надувний діелектричний підйомно-поворотний пристрій для полігонних вимірювань ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) радіолокаційних об'єктів. Запропоновано чисельний метод, заснований на наближенні фізичної оптики, призначений для розрахунку електромагнітного розсіювання даної діелектричної оболонки, складеної з торів

великих електричних розмірів. Наведено результати розрахунку її ЕПР у сантиметровому діапазоні довжин хвиль. Обговорюються технічні рішення щодо зниження рівня вторинного випромінювання підйомно-поворотного пристрою.

Ключові слова: діелектрична оболонка, полігонні виміри, фізична оптика, ефективна поверхня розсіювання.

Л.: 03. Бібліогр.: 17 найм.

UDC 621.396.96

Calculation of inverse scattering of an inflatable dielectric lifting-turning device for in situ measurements of scattering characteristics of radar objects / O. I. Sukharevsky, V. R. Nachaturov, G. S. Zalevsky, I. Ye. Ryapolov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2014. – Vol. 13. – № 2. – P. 112–118.

An inflatable dielectric lifting-turning device for ground measurements of the absolute cross-section (ACS) of radar objects is considered. For calculation of electromagnetic scattering of the mentioned dielectric shell composed of electrically large tori the numerical method based on physical optics approximation was proposed. Calculation results of its ACS in the SHF band are demonstrated. Technical solutions for reducing the secondary radiation level of the lifting-turning device are discussed.

Keywords: dielectric shell, ground measurements, physical optics, absolute cross-section.

Fig.: 03. Ref.: 17 items