

**Метод непосредственного измерения рассеянной мощности в радиочастотной безэховой камере при ее вертикальной поляризации и отрицательном угле падения волны**

Д.С. Кравченко

РТУ МИРЭА, г. Москва

Booty1@yandex.ru

*Рассмотрен метод учета рассеянной мощност от стенки БЭК для отрицательного угла падения волны при ее вертикальной поляризации с применением конкретного конструкционного материала, в частности, при покрытии стенок БЭК радиопоглощающим материалом «болото».*

**Введение**

Радиочастотные безэховые камеры (БЭК) используются для построения диаграмм направленности (ДН) излучения антенн, изучения электромагнитной совместимости, построения диаграмм эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) и др. Измерения могут проводиться на полноразмерных объектах или на уменьшенных моделях (с соответствующим изменением длины волны –  $\lambda$  излучения радара). Стационарные БЭК имеют уровень безэховости до (-40) дБ в диапазоне частот (1 – 40) ГГц. Экранирование от внешних воздействий обеспечивает затухание электромагнитной энергии (60 – 120) дБ в диапазоне (10 - 100) ГГц.

Основными качественными показателями БЭК являются коэффициент безэховости -  $K_6$ , определяемый отношением потока мощности -  $P_{\text{рас}}$ , рассеиваемого камерой, к потоку мощности от излучателя -  $P_{\text{пад}}$ ,

$$K_6 = 10\lg(P_{\text{рас}}/P_{\text{пад}}), \quad (1)$$

а также «кажущаяся» ЭПР -  $S_k$ . Коэффициент  $K_6$ , определяется во всем рабочем диапазоне частот БЭК и во всей ее безэховой зоне - пространстве, в любой точке которого  $K_6$  меньше заданного значения. Коэффициент  $K_6$  устанавливается по «наихудшему» его значению к безэховой зоне.

Метод непосредственного измерения рассеянной мощности является наиболее простым и оперативным, но его точность зависит от выбранной ДН индикаторной антенны. Реализация метода требует приемной антенны с малым уровнем боковых и задних лепестков ДН. Удовлетворительные измерения получаются, когда эти лепестки меньше измеряемого коэффициента  $K_6$  на (25 – 30) дБ. Так, для измерений коэффициента  $K_6$  уровня (-40) дБ требуется антенна, у которой боковые и задние лепестки диаграммы меньше (- 65, - 70) дБ. В настоящее время известны типы антенн, у которых ДН имеют малые лепестки. Это «диагональные» рупорные антенны, покрытые радиопоглощающими материалами (РПМ) и ребристые рупорные антенны.

В таблице 1 представлены некоторые РПМ и их свойства, которыми облицовывают стенки безэховых камер для проводимых исследований радиолокационной и радионавигационной аппаратуры.

Таблица 1 - Некоторые типы радиопоглощающих материалов

| № | Материал                                | Тип, марка | Диапазон длин волн, см. | Коэффициент отражения, - дБ | Толщина, мм. | Масса 1 м <sup>2</sup> , кг |
|---|---|------------|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | Резиновые коврики                       | В2Ф - 2    | 0,8 - 4                 | 15 - 20                     | 19 - 30      | 4 - 5                       |
| 2 | Магнитодиэлектрические пластины         | ХВ - 0,8   | 0,8                     | 15 - 20                     | 1 - 3        | 3 - 10                      |
| 3 | Поглощающие покрытия на основе поролона | «Болото»   | 0,8 - 100               | 15 - 20                     | —            | —                           |
| 4 | Ферритовые пластины                     | СВЧ-0,68   | 15 - 200                | 14 - 15                     | 4 - 20       | 20 - 70                     |

### 1. Постановка задачи

Падающую на прямоугольник, плоскую электромагнитную  $\vec{E}^i$  - поляризованную волну с произвольной линейной поляризацией представим в виде:

$$\vec{E}^i = \vec{E}_{0z}^i \cdot e^{ik_i \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)}, \quad (k_i = |\vec{k}_i| = k) \quad (1.1)$$

где  $\vec{E}_{0z}^i$  - амплитудное значение волны,  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \gamma$  - направляющие косинусы волнового вектора падающей волны  $\vec{E}^i$  - комплексная амплитуда волны (рис 1).

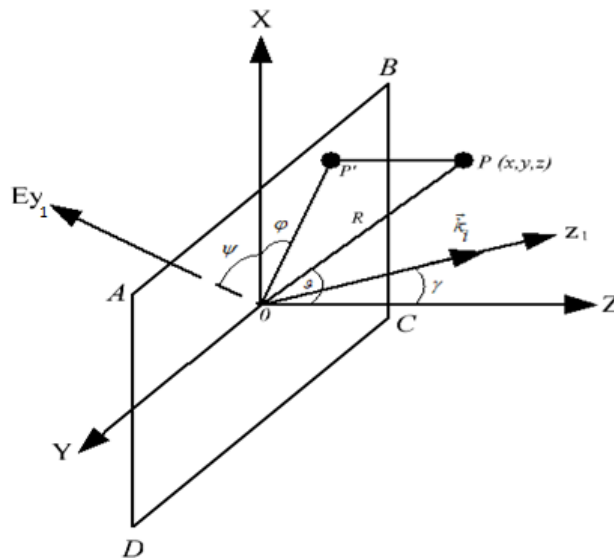


Рис.1. Геометрическое построение процесса облучения стенки БЭК

На рис. 1.: ABCD - рассеивающая площадка, R - расстояние от 0 до точки наблюдения P,  $\vec{k}_i$  - волновой вектор падающей волны,  $\gamma$  - угол падения,  $\varphi$  - угол наблюдения,  $P(x, y, z)$  - точка наблюдения,  $\vec{E}_{y1}$  - вектор электрического поля,  $\psi$  - угол между вектором  $\vec{E}$  и осью X,  $\vartheta$  - угол между R и осью Z.

Рассмотрим дифракцию волны с электрическим вектором, лежащим в плоскости четырехугольника.

Для электрической компоненты полного поля вблизи поверхности имеем:

$$E_{y1} = E_{0y1} \cdot e^{ik \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)} + R^e \cdot E_{0y1} \cdot e^{ik \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta - z \cos \gamma)}, \quad (1.2)$$

где  $E_{0y1} \cdot e^{ik \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)}$  ( $k_i = |\vec{k}_i| = k$ ) - падающая волна,

$E_{0y1} \cdot e^{ik \cdot (x \cos \alpha + y \cos \beta - z \cos \gamma)}$  ( $k_i = |\vec{k}_i| = k$ ) - отраженная волна,

$R^e$  - комплексный коэффициент отражения.

Компоненты магнитного поля в системе координат  $(x, y, z)$  соответственно равны:

$$E_x = E_{y1} \cdot \cos \psi; \quad E_y = E_{y1} \cdot \sin \psi; \quad E_z = 0 \quad (1.3)$$

т. к. вектор  $E$  лежит в плоскости  $xOy$ .

Компоненты магнитного поля найдем с помощью первого уравнения Максвелла для гармонических волн:

$$\text{rot } \vec{E} = ik \mu \vec{H} \quad \vec{H} = \frac{1}{ik} \text{rot } \vec{E} \quad (1.4)$$

На рисунке 2 изображены графики угловых зависимостей коэффициента беззховости  $K_6$  и его аргумента от угла падения  $\gamma$ , а на рисунке 3 модуль фазы. Из рисунка 2 видно, что имеет место экстремум, а также минимум  $K_6$  при  $\gamma$ , близком к  $90^\circ$ .

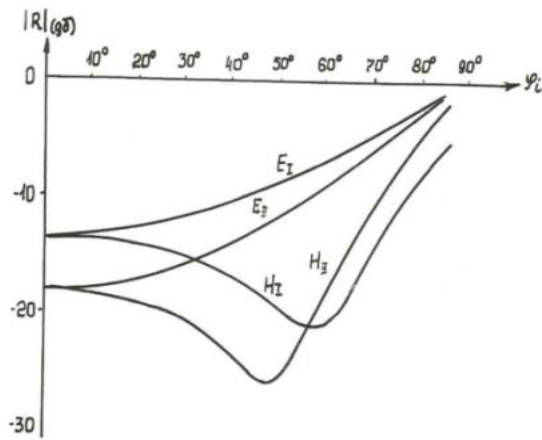


Рис.2. Графики угловых зависимостей коэффициента беззховости

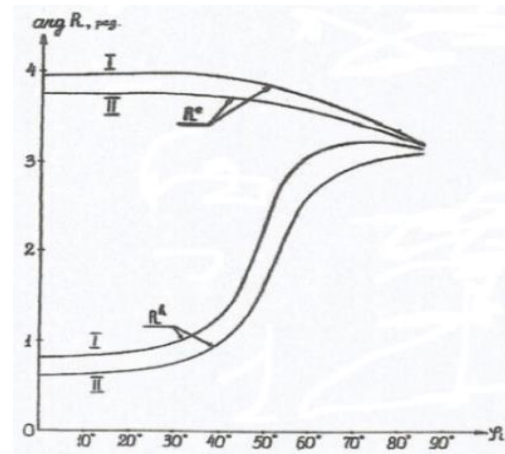


Рис.3. Модуль фазы КО

## 2. Расчетные формулы

$$E_x = ik \frac{e^{ikR}}{R} \cdot \left[ Q_p^e(\vartheta, \varphi) \cdot \sin \vartheta \sin \varphi + Q_m^e(\vartheta, \varphi) \cdot \cos \vartheta \cdot (\cos \psi - \sin^2 \vartheta \cdot \cos \varphi \cdot \cos(\psi + \varphi)) \right] \quad (1.5)$$

$$E_y = -ik \frac{e^{ikR}}{R} \cdot \left[ Q_p^e(\vartheta, \varphi) \cdot \sin \vartheta \sin \varphi - Q_m^e(\vartheta, \varphi) \cdot \cos \vartheta \cdot (\sin \psi + \sin^2 \vartheta \cdot \sin \varphi \cdot \cos(\psi + \varphi)) \right] \quad (1.6)$$

$$E_z = ik \frac{e^{ikR}}{R} \cdot \left[ Q_p^e(\vartheta, \varphi) \cdot \cos(\psi + \varphi) \cdot \sin \vartheta \cdot (1 + \cos \gamma \cdot \cos \vartheta) \right] \quad (1.7)$$

### 3. Результаты численных расчетов

Значения РПМ для «болото» при  $\lambda = 100$  см, с комплексным коэффициентом отражения  $R^e$ , фазой  $\varphi$  и расчетными данными, приведены в таблицах 2, 3 и 4 соответственно, при размерах четырехугольника -  $a = 1500$  см,  $b = 800$  см, и расстоянии  $R$  от 0 до точки наблюдения, равном 120 см.

Ориентация плоскости падения волны на прямоугольник задается углами  $\psi = \pi/2$  и  $\varphi = \pi/2$ . Направление падения волны задается направляющими косинусами  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ , и  $\cos \gamma$  относительно осей координат  $(x, y, z)$ . В случае падения волны в плоскости  $XOZ$ , где  $\alpha = \pi/2$ ;  $\beta = \pi/2 - \gamma$ ; для угла облучения  $\gamma = -60^\circ$ .

Таблица 2 - Компонента  $E_x$   $\psi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma$ .

| R <sup>e</sup> (РПМ-I) $\lambda = 100$ см |                |    |        |        |         |                        |                       |           |                                  |                      |                         |
|---|----------------|----|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | E <sub>xрпм</sub> мВт/м |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | 5,591*10 <sup>-4</sup>  |
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | дБ <sub>xрпм</sub>      |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | - 65,05                 |

Таблица 3 - Компонента  $E_y$   $\psi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma$

| R <sup>e</sup> (РПМ-I) $\lambda = 100$ см |                |    |        |        |         |                        |                       |           |                                  |                      |                         |
|---|----------------|----|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | E <sub>yрпм</sub> мВт/м |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | 1,799*10 <sup>-3</sup>  |
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | дБ <sub>yрпм</sub>      |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | - 54,901                |

Таблица 4 - Компонента  $E_z$   $\psi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ;  $\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma$

| R <sup>e</sup> (РПМ-I) $\lambda = 100$ см |                |    |        |        |         |                        |                       |           |                                  |                      |                         |
|---|----------------|----|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|----------------------|-------------------------|
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | E <sub>zрпм</sub> мВт/м |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | 2,797*10 <sup>-4</sup>  |
| №   | $\gamma^\circ$ | дБ | a (см) | b (см) | f (МГц) | Модуль КО (в отн. ед.) | Мощность (в отн. ед.) | $\varphi$ | R <sup>e</sup> (V <sup>e</sup> ) | Im (V <sup>e</sup> ) | дБ <sub>zрпм</sub>      |
| 1   | -60            | -9 | 1500   | 800    | 300     | 0,355                  | 0,126                 | 3,62      | 0,354                            | 0,001                | -71,066                 |

### 4. Диаграммы рассеяния электромагнитных волн при отрицательном угле падения волны для $\lambda = 100$ см

Диаграммы рассеяний в случае падения волны в плоскость  $XOZ$  при углах  $\alpha = \pi/2$ ;  $\beta = \pi/2 - \gamma$  для компонент  $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_z$  отраженной от стенки БЭК плоской электромагнитной волны при отрицательном угле облучения  $\gamma = -60^\circ$  и  $\lambda = 100$  см по напряженности электромагнитного поля приведены на рисунках 4 – 6 (а), и амплитуде приведены на рисунках 4 – 6 (б).

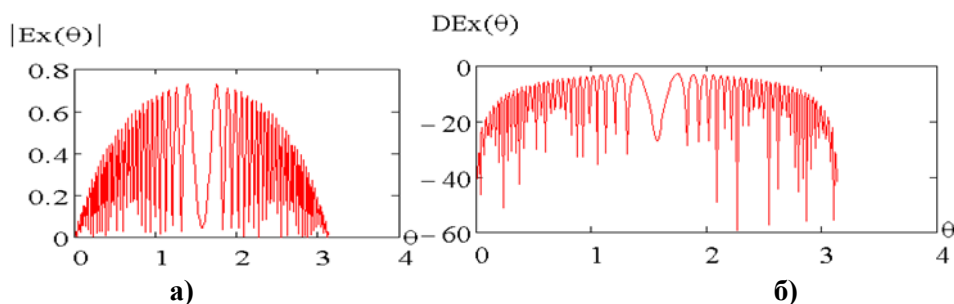


Рис.4. Диаграмма рассеяния электромагнитной волны на четырехугольнике по мощности электромагнитного поля (а) и амплитуде (б) для  $\gamma = -60^\circ$

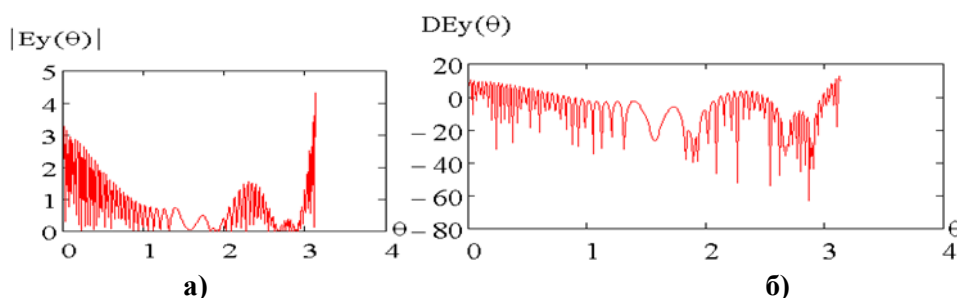


Рис.5. Диаграмма рассеяния электромагнитной волны на четырехугольнике по мощности электромагнитного поля (а) и амплитуде (б) для  $\gamma = -60^\circ$

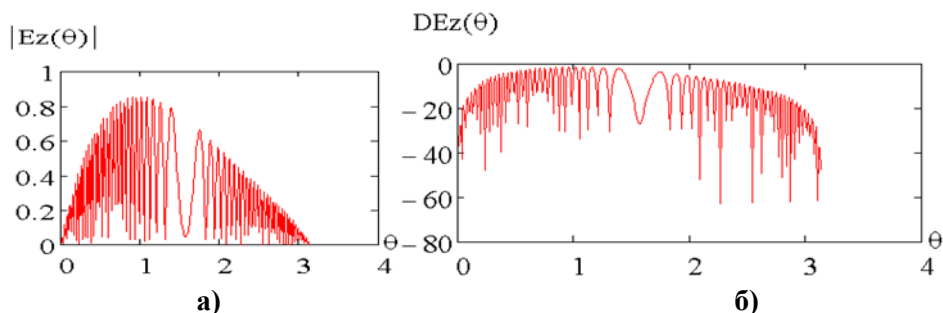


Рис.6. Диаграмма рассеяния электромагнитной волны на четырехугольнике по мощности электромагнитного поля (а) и амплитуде (б) для  $\gamma = -60^\circ$

## 5. Анализ результатов

Анализ результатов исследования показал, что:

1) Значение мощности отражённого сигнала при  $-9$  дБ при  $\lambda = 100$  см является наихудшим;

2) Полученное значение  $K_6$  недостаточно, поэтому необходимо стенки БЭК облицовывать другим, более эффективным РПМ, либо использовать методы (для решения соответствующих задач), позволяющие уменьшить рассеяние ЭМВ стенками БЭК.

## Заключение

Проработана методика учета отражений радиоволны от стенок БЭК при ее вертикальной поляризации для отрицательного угла падения волны на четырехугольник, с применением конкретного конструкционного материала, в частности, для покрытия стенок БЭК радиопоглощающим материалом «болото» с

использованием компонент  $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_z$ . В связи с этим решение задач дифракции, каковой является рассмотренная в настоящей работе задача, является актуальной и представляет интерес для специалистов, занимающихся радиолокационными исследованиями с использованием БЭК.

### **Литература**

1. П.Я. Уфимцев Метод краевых волн в физической теории дифракции // М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
2. П.Я. Уфимцев Дифракция на черных телах и на полупрозрачных пластинах // Известия вузов. Радиофизика. – 1968. – Т. XI, № 6. – С.1867–1869.
3. Д.С. Кравченко, А.К. Черепанов Дифракция плоской электромагнитной волны на непрозрачном прямоугольнике с заданным эффективным комплексным коэффициентом отражения, при Е – поляризации падающей волны // VI Всероссийская научная конференция «Радиофизические методы в дистанционном зондировании». – Муром, 2014. – С. 272–277.