

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НЕЗАМКНУТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЭКРАНОВ

Д. Д. Иванченко<sup>1</sup>, И. О. Сухаревский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина  
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

<sup>2</sup> Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [i.sukharevsky@gmail.com](mailto:i.sukharevsky@gmail.com)

Приводятся результаты экспериментальных исследований диаграмм обратного рассеяния металлических незамкнутых сферических экранов при изменении частоты зондирующего сигнала в диапазоне от 26,2 до 38,4 ГГц. При этом радиус сферического сегмента был равен 18,08 мм, а радиус апертуры сферического экрана – 12,55 мм. Образец был изготовлен методом выдавливания из алюминиевой фольги толщиной 0,15 мм.

В результате измерений получены частотные зависимости нормированной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) при облучении тонкого сферического сегмента вдоль его оси. Приводится сравнение экспериментальных данных с результатами известных теоретических расчетов ЭПР, полученных методом собственных функций. Исследованы особенности поведения диаграмм обратного вторичного излучения сферического сегмента в широкой полосе частот и углов падения. Ил. 6. Библиогр.: 2 назв.

**Ключевые слова:** измерения обратного рассеяния, незамкнутый металлический экран.

В статье исследуется поведение частотной зависимости величины обратного рассеяния образца в виде металлического незамкнутого сферического экрана при осевом падении на него электромагнитной волны, а также угловые зависимости обратного вторичного излучения при повороте образца в  $\vec{H}$ -плоскости.

Геометрия исследуемого образца и его размеры показаны на рис. 1. Образец был изготовлен методом выдавливания из алюминиевой фольги толщиной 0,15 мм. Радиус сферического сегмента выбирался равным  $r = 18,08$  мм, а радиус апертуры сферического экрана  $a_m = 12,55$  мм. При этом угол  $\theta_0 = 45,87^\circ$ . Точность изготовления сферического экрана  $\sim 0,05$  мм.

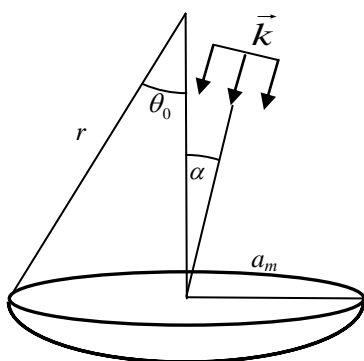


Рис. 1. Геометрия исследуемого образца

Измерения проводились на установке, блок-схема которой показана на рис. 2, в диапазоне частот  $f_{\min} = 26,2$  ГГц,  $f_{\max} = 38,4$  ГГц. Она представляет собой установку квазиоптического типа с разнесенными приемно-передающими антеннами, расположенными почти вплотную, что

позволяет измерять квазиобратное (радиолокационное) рассеяние. В качестве генератора СВЧ-сигнала использовался генератор качающейся частоты (ГКЧ) измерителя КСВн и ослабления типа Р2-65. Передающая и приемная антенные системы выполнены идентично в виде пирамидального рупора высотой 210 мм с квадратной апертурой размерами 80×80 мм. В апертурах передающего и приемного рупоров расположены фазоисправляющие линзы, выполненные из пенополистирола. Приемный и передающий рупоры разнесены в плоскости  $\vec{H}$  падающего поля, имеют одинаковое направление поляризации и расположены в непосредственной близости друг от друга (расстояние между геометрическими центрами апертур составляло 85 мм). Такое расположение излучателей позволяет добиться развязки между передающим и приемным рупорами  $\sim 65$  дБ. Исследуемый образец располагался на расстоянии  $R = 1500$  мм от апертуры передающего рупора на подвесах из нити диаметром 0,2 мм. Нить крепилась на раме, размеры которой выбирались из условия ее минимального влияния на диаграмму направленности передающего рупора. Рама, в свою очередь, устанавливалась в поворотном-юстировочное устройство таким образом, чтобы ось вращения проходила через геометрический центр апертуры образца.

Исследуемый образец облучался линейно-поляризованной волной. Сигнал с выхода приемного рупора детектировался высокочувствительным квадратичным детекторным устройством, выполненным на базе диода Шоттки, и подавался на вход индикаторного блока измерителя Р2-65. После обработки сигнал с выхода индикатора через схему сопряжения подавался на вход

аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а с него – на вход персонального компьютера (ПК). Для передачи данных в ПК использовался 18-битный АЦП AD7641 фирмы *Analog Devices*. Для соединения со стороны ПК использовался COM-порт. Для обмена данными использовался протокол RS-232. Программное обеспечение по

обслуживанию данной установки написано в среде разработки *Delphi*. Подпрограмма оцифровки единичного измерения и считывания данных АЦП написана на ассемблере, что позволило получить 3400 точек отсчета за один период развертки на ПК с платформой *Windows*, процессором *Intel Pentium III-450*.

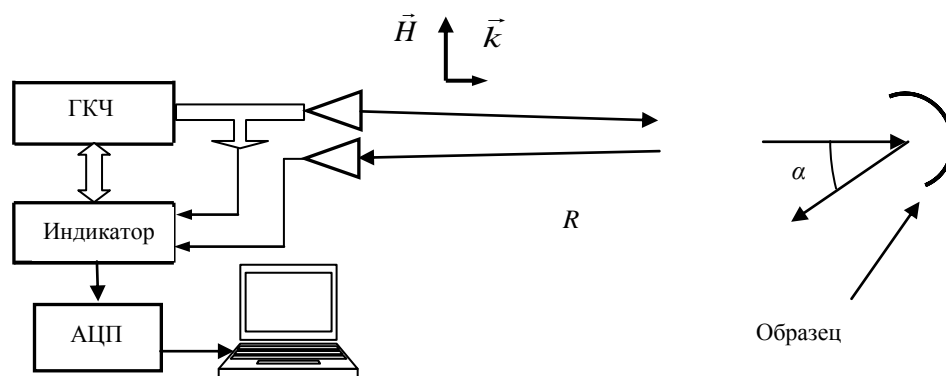


Рис. 2. Блок-схема измерительной установки

Время, за которое происходило частотное сканирование (изменение частоты от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ ), составляло 1 с. Этот участок разбивался на 3400 интервалов. Привязка точек по частоте проводилась с помощью волномеров в диапазоне от 27,4 до 37,6 ГГц. Погрешность измерения частоты во всем указанном диапазоне не превышала  $\pm 0,1\%$ . Методом наименьших квадратов строилась калибровочная кривая, и полученные данные экстраполировались до конца диапазона измерений.

Перед началом измерений проводилась юстировка всей установки. При этом добивались совмещения максимумов диаграмм направленности приемного и передающего рупоров с геометрическим центром апертуры образца, в качестве которого в данном случае использовался диск диаметром 28 мм и толщиной 0,15 мм. Далее проводилась настройка по максимуму величины отраженного от диска сигнала. Затем на место диска был помещен исследуемый образец и проводились измерения характеристик рассеяния образца при осевом зондировании. Исследование частотных характеристик обратного вторичного рассеяния проводилось путем вращения образца на угол  $\alpha$  в плоскости  $\vec{H}$  падающего поля. Динамический диапазон сигналов, измеряемых данной установкой, превышает 50 дБ.

В качестве величины, характеризующей уровень обратного отражения какого-либо объекта, используют, как правило, ЭПР [1]. Непосредственные измерения ЭПР вызывают затруднения, поэтому используют сравнение уровней сигнала, рассеянного исследуемым образцом ( $U_m$ ), с сиг-

налом, рассеянным эталоном ( $U_{sp}$ ), в качестве которого использовалась металлическая сфера радиусом  $a_{sp} = 11,92$  мм. Задача о рассеянии сферой плоской электромагнитной волны имеет строгое решение и наиболее полно исследована по сравнению с другими телами, имеющими простую форму.

Как показали предварительные измерения, уровень отраженного от сферы сигнала на 5–10 дБ превышал уровень помехи. Для компенсации шумовой составляющей помехи проводилось усреднение измеренных данных по 32 реализациям. Взаимные переотражения между антеннами и образцом, отражения от посторонних предметов (что всегда имеет место в лабораторных условиях), а также переотражения в приемном и передающем трактах приводят к «модуляции» полезной составляющей сигнала. Поэтому при обработке результатов использовалось «оконное» сглаживание. Ширина окна составляла 250 МГц. На рис. 3 приведены примеры измеренных уровней сигналов, отраженных от сферического сегмента ( $U_m$  – верхняя серая линия) и металлической сферы ( $U_{sp}$  – нижняя серая линия) – кривые 2 и 4 соответственно. На этом же рисунке приведены сглаженные данные  $U_{m\_sm}$  и  $U_{sp\_sm}$ , соответственно, для сегмента и сферы (черные линии, кривые 1 и 3). По оси абсцисс отложены значения частоты  $f$  в гигагерцах, а по оси ординат – величина измеренного сигнала, пропорциональная его мощности.

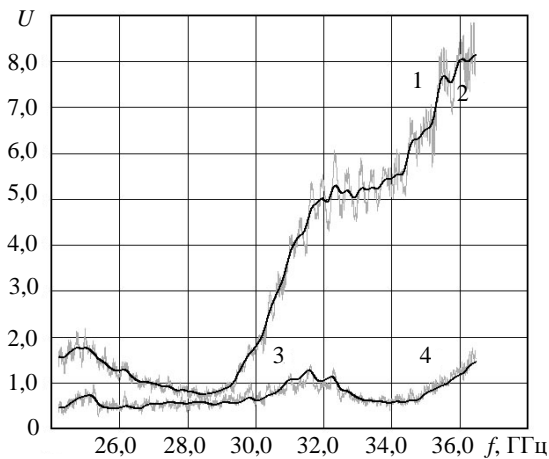


Рис. 3. Измеренные и сглаженные уровни обратно-рассеянного поля для сферического сегмента и сферы

На рис. 4 показана экспериментальная зависимость (—□) нормированного значения ЭПР  $-\sigma_m / \pi a_m^2$  сферического сегмента от безразмерного частотного параметра  $ka_m$  ( $k = 2\pi / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны). Величина  $\sigma_m$  для каждого значения  $ka_m$  рассчитывалась по формуле  $\sigma_m = \sigma_r U_{m\_sm} / U_{sp\_sm}$ , где значения  $\sigma_r$ ,  $U_{m\_sm}$  и  $U_{sp\_sm}$  определялись для каждого из значений частоты  $f = c / \lambda$ .

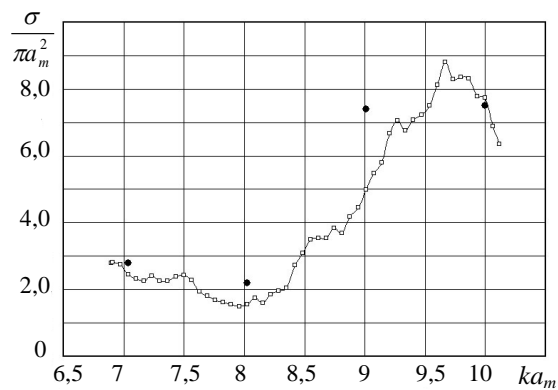


Рис. 4. Измеренная ЭПР сферического сегмента при осевом зондировании ( $\alpha = 0^\circ$ )

Здесь же приведены значения, полученные методом собственных функций в работе [2] (точки). Обе кривые качественно имеют сходное поведение. Определенные различия (в худшем случае порядка 30 %) обусловлены различием угла  $\theta_0$  экспериментального образца и сферического сегмента, рассматриваемого в работе [2], неточностью изготовления сферического сегмента, а также ошибками измерений малых уровней

сигналов, отраженных от сегмента и сферы, погрешностями измерений частоты, влиянием крепежно-юстировочных устройств на величину обратно-рассеянного поля.

На рис. 5 и 6 приведены экспериментальные значения уровней энергии обратного рассеяния  $U_{m\_sm}$  сферического сегмента при изменении угла падения  $\alpha$  электромагнитной волны в  $\vec{H}$ -плоскости для разных значений частоты.

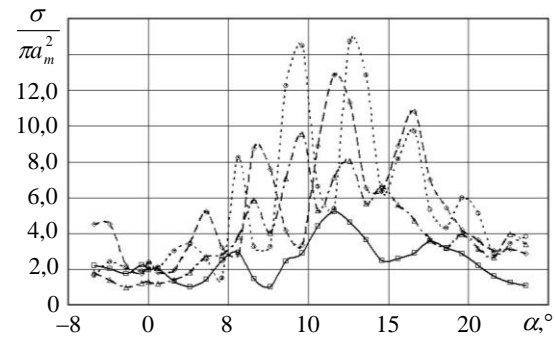


Рис. 5. Угловые зависимости рассеянного поля: —□—  $ka_m = 7,02$ ; —○—  $ka_m = 7,36$ ; —●—  $ka_m = 7,63$ ; —△—  $ka_m = 8,15$

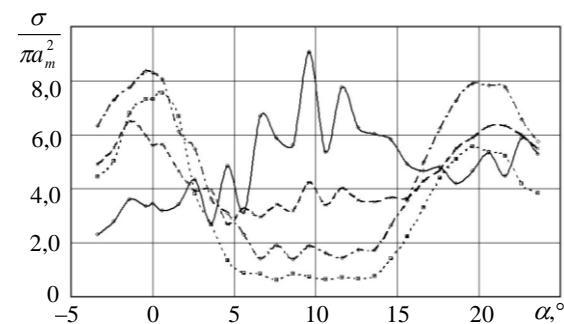


Рис. 6. Угловые зависимости рассеянного поля: —●—  $ka_m = 8,55$ ; —×—  $ka_m = 9,07$ ; —◇—  $ka_m = 9,6$ ; —□—  $ka_m = 10,02$

В области углов падения  $5^\circ < \alpha < 18^\circ$  (рис. 5) в диапазоне  $7,02 \leq ka_m \leq 8,15$  наблюдается резкое изменение величины рассеянного поля, что связано, видимо, с интерференционными явлениями, тогда как вне этих углов изменения  $U_{m\_sm}$  незначительны. Осциллирующий характер рассеянного поля наблюдается и для больших частот, но уже для всего исследуемого сектора углов падения (рис. 6). При больших значениях частоты облучающего поля ( $ka_m \geq 9$ ) поле с увеличением угла  $\alpha$  плавно спадает при  $\alpha = 5^\circ$ , а затем при  $\alpha = 20^\circ$  возрастает практически до тех же значений, что и при  $\alpha = 0^\circ$ . При углах падения  $\alpha = 3-5^\circ$  и  $\alpha = 16-17^\circ$  величина обратно-рассеянного поля с изменением частоты претерпевает незначительные изменения. Следует отметить, что при уменьшении спектрального пара-

метра  $ka_m$  с 10 до 7 энергия обратного рассеяния при осевом облучении снижается более чем в четыре раза. Это объясняется, по-видимому, интерференцией вкладов отдельных зон Френеля на сферическом сегменте.

Таким образом, изложенная методика измерений и рассмотренный измерительный комплекс может быть использован для измерения вторичного излучения незамкнутых тонких металлических экранов. Измерения с помощью данного комплекса могут проводиться для экранов не только сферической формы. При соответствующей модернизации измерительного комплекса возможно проведение эксперимента в бистатическом случае. Полученные зависимости имеют самостоятельный интерес.

1. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
2. Виноградов С. С. Об отражательной способности сферического экрана // Изв. вузов. Радиофизика. – 1983. – 26, № 1. – С. 91–102.

#### BACKSCATTERING MEASUREMENTS FOR METALLIC UNCLOSED SPHERICAL SCREENS

D. D. Ivanchenko, I. O. Sukharevsky

Electromagnetic backscattering measurements for metallic unclosed spherical screens in the range of 26,2 to 38,4 GHz are presented. The radii and aperture of a spherical segment was

equal to 18,08 and 12,55 mm, respectively. The sample was made by extrusion of aluminum foil with thickness 0,15 mm.

Frequency dependencies of the normalized radar backscattering (RCS) diagrams were obtained for excitation of a thin spherical screen along the axis. A comparison of experimental data and known theoretical treatment for RCS are given. Backscattering behavior is studied in the wide range of frequencies and incidence angles.

**Key words:** backscattering measurements, unclosed metallic screen.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОРИННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ МЕТАЛЕВИХ НЕЗАМКНЕНИХ СФЕРИЧНИХ ЕКРАНІВ

Д. Д. Иванченко, І. О. Сухаревський

Наведено результати експериментальних досліджень діаграм зворотного розсіяння металевих незамкнених сферичних екранів при змінній частоті зондуючого сигналу в діапазоні від 26,2 до 38,4 ГГц. При цьому радіус сферичного сегмента дорівнював 18,08 мм, а радіус апертури сферичного екрана – 12,55 мм. Зразок було виготовлено методом витискування з алюмінієвої фольги завтовшки 0,15 мм.

У результаті вимірювань отримано частотні залежності нормованої ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) при опроміненні тонкого сферичного сегмента уздовж його осі. Наведено порівняння експериментальних даних з результатами відомих теоретичних розрахунків ЕПР, отриманих методом власних функцій. Досліджено особливості поведінки діаграм зворотного вторинного випромінювання сферичного сегмента в широкій смузі частот і кутів падіння.

**Ключові слова:** вимір зворотного розсіяння, незамкнений металевий екран.

*Рукопись поступила 15 апреля 2009 г.*