

УДК 621.317.757

КАЛИБРОВКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ

Э. О. Можаров, Н. К. Галкин

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана,
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

Статья поступила в редакцию 3 октября 2018 г.

Аннотация. Разработан и апробирован автоматизированный лабораторный стенд для измерения характеристик рассеяния объектов в диапазоне частот от 4 до 15 ГГц. Описан и применен алгоритм обработки отраженных сигналов с применением временного окна и вычитанием фона. Проведена серия экспериментов по измерению и сравнению с расчетными значениями эффективной площади рассеяния (ЭПР) нескольких объектов. Измерены моностатические ЭПР уголкового отражателя и металлических пластин.

Ключевые слова: характеристики рассеяния, калибровка, эффективная площадь рассеяния (ЭПР), временная область, оконное преобразование Фурье.

Abstract. The automated laboratory bench for objects scattered characteristics measuring in the frequency range from 4 to 15 GHz is developed and approved. The main elements of the stand are the vector network analyzer, the broadband antenna (1-17 GHz) and the turntable. To suppress reflections from the walls, ceiling and floor of the range and auxiliary equipment the time domain gating of the reflected signal and subtraction of the background are used. The processing algorithm for reflected signals is described and applied. The series of three transformations of the received signal is performed: from the frequency domain to the time domain, the selection of the time gate width and position, the transition from the time domain to the frequency domain. The experiments series of comparing the theoretical values of radar cross-section (RCS) with measured for some spheres are performed. The analysis of the measurement data revealed the features of the stand. Firstly, the duration and parameters of the time gate for the object under test and the standard

should be the same. Secondly, the transformation specificity does not allow to use the beginning and end of the all measured frequency band.

The RCS of the 4 plastic spheres with a diameter of 300 mm with the conductive coating and the same sphere covered with silver were measured. High repeatability of the scattering characteristics of five spheres is noted. Monostatic RCS of angular reflectors and metal plates in C- and X-bands are measured.

Key words: scattering characteristics, calibration, radar cross-section (RCS), time domain, window Fourier transform.

1. Введение

Современные радиолокационные станции рассчитаны для обнаружения крупных металлических летательных объектов, которые имеют достаточно большие габариты [1-4]. Стремительное развитие малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (МБПЛА), таких как квадрокоптеры, октокоптеры, беспилотные аппараты самолетного и вертолетного типа ставит перед разработчиками РЛС задачу по обнаружению объектов с очень низким значением ЭПР и малой скоростью перемещения [5-8]. В связи с этим возникает потребность в создании стендов измерения характеристик рассеяния объектов с низким уровнем ЭПР. Низкий уровень ЭПР МБПЛА связан не только с малыми габаритами изделий и примененных в них слабо отражающих композиционных материалов, но и с применением специальных форм изделий.

Цель данной работы рассчитать и экспериментально подтвердить эффективные поверхности рассеяния эталонных целей, применяемых для калибровки при измерении ЭПР МБПЛА. Виды эталонов: сфера, уголкового отражатель, металлическая пластина.

2. Расчет эффективной поверхности рассеяния эталонных целей

Приведём основные соотношения, используемые при расчете ЭПР эталонных целей.

Моностатическое ЭПР сферы

В работе [9] представлена формула расчета ЭПР сферы (1).

$$\begin{cases} \sigma(ka) = \sigma_m \cdot U(ka) \\ \sigma(ka) \approx \sigma_m = \pi \cdot a^2 \text{ при } 2a \gg 10\lambda \end{cases} \quad (1)$$

$$U(ka) = \left| \frac{2}{ka} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot (2n+1) \cdot \left\{ \frac{j_n(ka)}{h_n^{(1)}(ka)} - \frac{\frac{d}{ka}(ka \cdot j_n(ka))}{\frac{d}{ka}(ka \cdot h_n^{(1)}(ka))} \right\} \right|^2, \quad (2)$$

$$j_n(ka) = \sqrt{\frac{\pi}{2ka}} \cdot J_{n+\frac{1}{2}}(ka), \quad (3)$$

$$h_n^{(1)}(ka) = \sqrt{\frac{\pi}{2ka}} \cdot H_{n+\frac{1}{2}}^{(1)}(ka), \quad (4)$$

где a – радиус сферы;

σ – ЭПР;

σ_m – ЭПР сферы при условии $2a \gg 10\lambda^2$;

λ – длина волны в свободном пространстве;

$k=2\pi/\lambda$ – волновое число;

a – радиус сферы;

$j_n(ka)$ – сферическая функция Бесселя;

$h_n^{(1)}(ka)$ – сферическая функция Ханкеля;

$J_{n+\frac{1}{2}}(ka)$ – функция Бесселя первого рода;

$H_{n+\frac{1}{2}}^{(1)}(ka)$ – функция Ханкеля первого рода.

Нормированное ЭПР сферы к πa^2 в зависимости от отношения диаметра сферы к длине волны представлено на рис. 1.

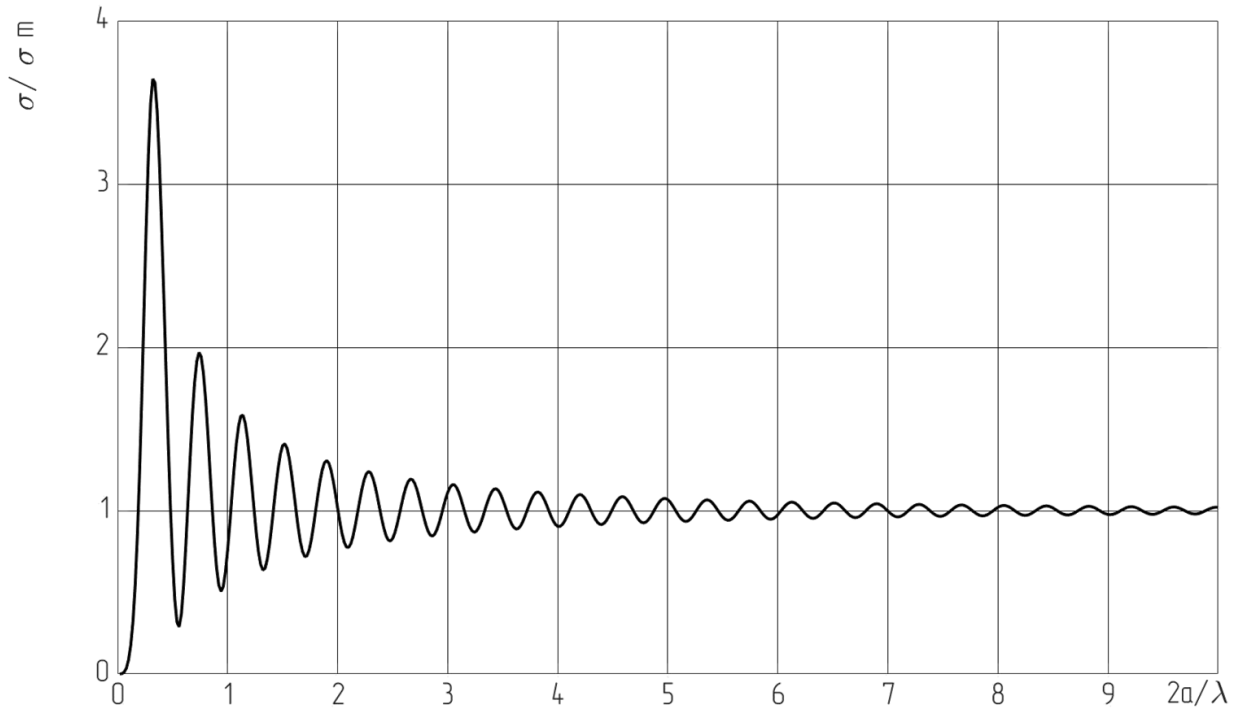


Рис. 1 Нормированное ЭПР сферы

Моностатическое ЭПР уголкового отражателя

Грани уголкового отражателя бывают трех видов: треугольные, секторные и квадратные (см. рис. 2).

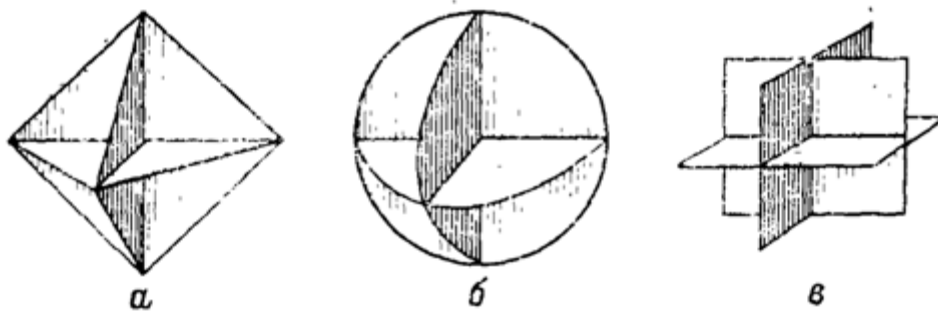


Рис. 2 – Виды уголкового отражателя: с треугольными гранями (а), с секторными гранями (б) и с квадратными гранями (в)

ЭПР уголкового отражателя рассчитывается по формулам (5)-(7) [9]:

с треугольными гранями

$$\sigma = \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (5)$$

с секторальными гранями

$$\sigma = 2\pi \cdot \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (6)$$

с квадратными гранями.

$$\sigma = 12\pi \cdot \frac{a^4}{\lambda^2}, \quad (7)$$

где a – длина стороны грани уголкового отражателя.

ЭПР плоской металлической пластины по нормали к пластине, без учета дифракции электромагнитного поля на краях, рассчитывается по формуле (8).

$$\sigma = 4\pi \cdot \frac{S_{пл}^2}{\lambda^2}. \quad (8)$$

Расчетные значения ЭПР эталонов НИИ РЭТ

Часть имеющихся в наличии отражателей представлена на рис. 3-4. Это металлические шары диаметра 19 мм, 50 мм и 100 мм, диэлектрические сферы с металлическим покрытием диаметра 300 мм, 500 мм и 600 мм, а также уголковые отражатели с различными гранями (круглыми, квадратными, треугольными).

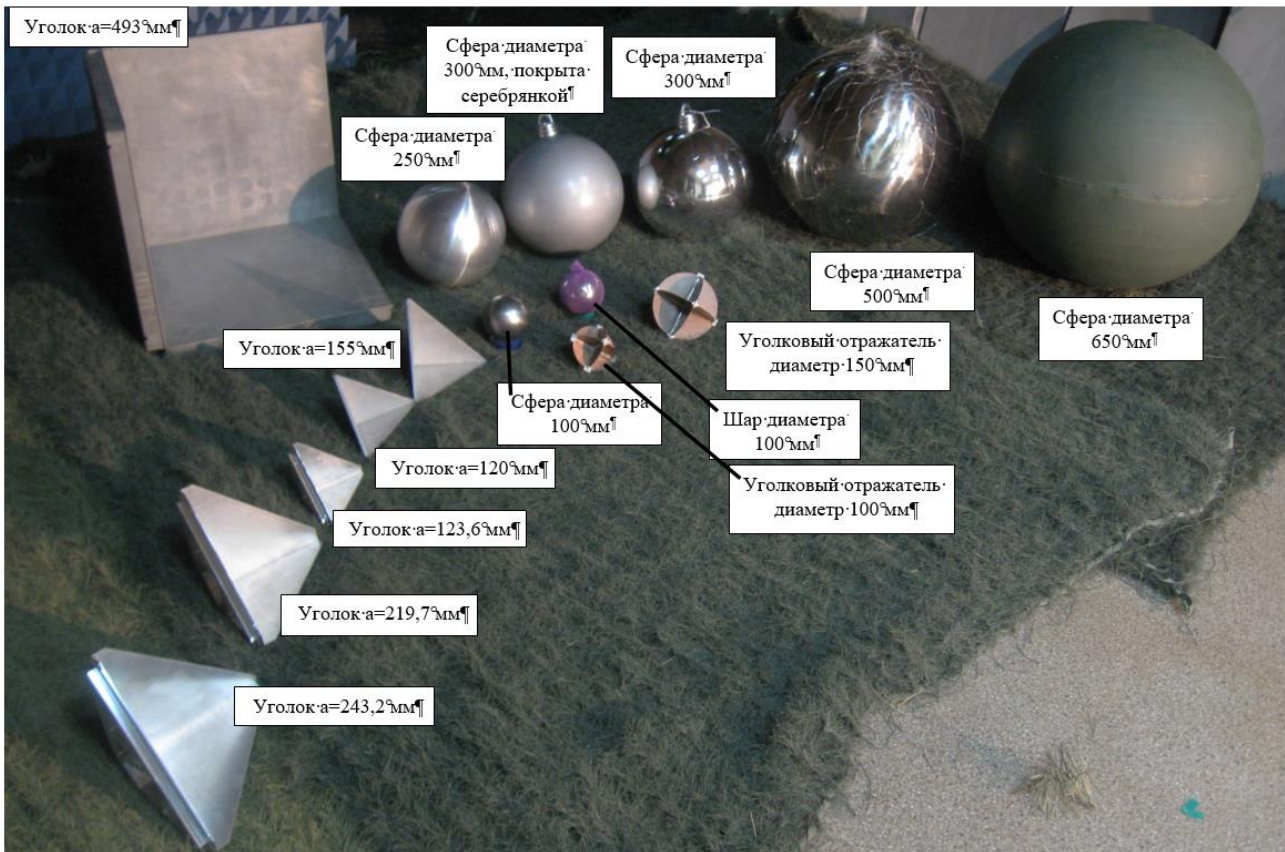


Рис. 3 – Эталонные отражатели

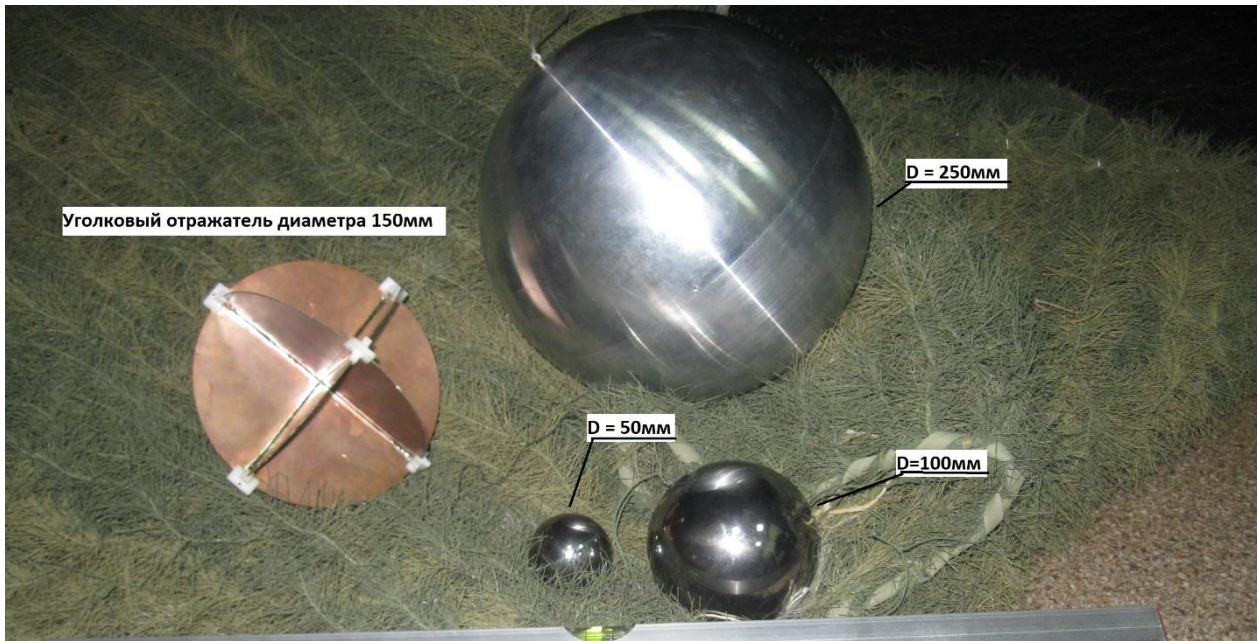


Рис. 4 – Эталонные отражатели

3. Лабораторный стенд измерения отражательных характеристик объектов

Разработан и собран лабораторный стенд, схема которого представлена на рис. 5. Стенд в данной конфигурации предназначен для измерения моностатических ЭПР объектов в диапазоне частот 4-15 ГГц [10-12].

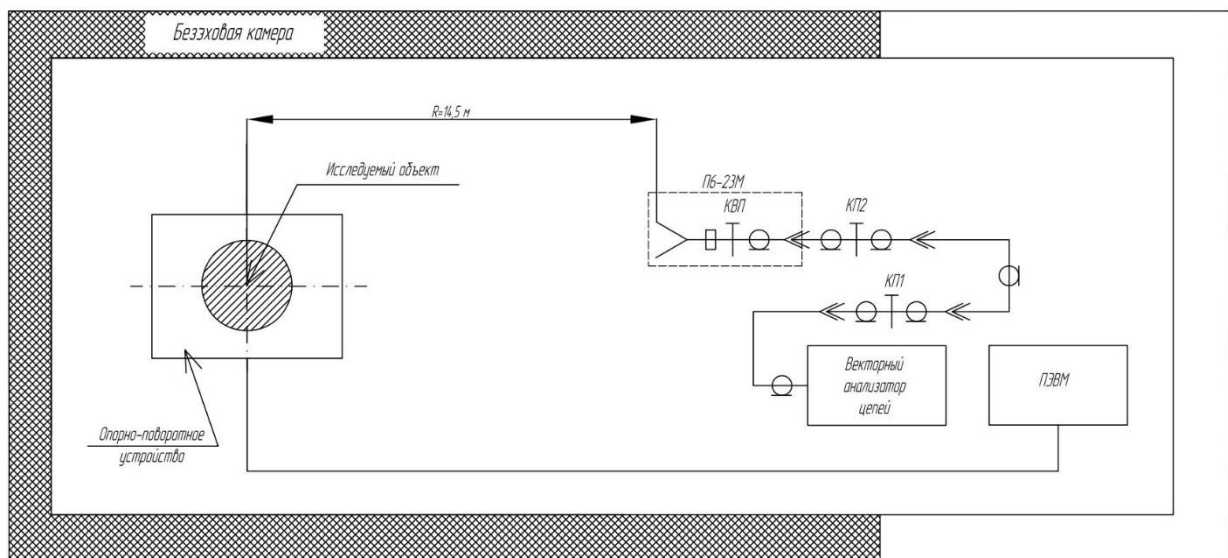


Рис. 5 – Схема стенда измерения моностатических ЭПР объектов

На рис. 6 представлено оборудование стенда. Эксперимент проводится в режиме измерения коэффициента отражения (S_{11}) векторным анализатором цепей (ВАЦ) с использованием фильтрации во временной области.



Рис. 6 – Оборудование стенда измерения ЭПР

Измерительная антенна П6-23М подключена к порту № 1 ВАЦ гибким коаксиальным кабелем, с использованием необходимых для этого переходов: коаксиальные переходы 2,4 мм – 3,5 мм (КП1) и SMA – тип III (КП2), и коаксиально волноводный переход (КВП) в составе измерительной антенны П6-23М. Цели располагаются в безэховой камере (БЭК) на полиамидной леске (см. рис. 7). Поворот объектов по азимуту реализуется с помощью опорно-поворотного устройства ОПУ-300.

После проведения измерений S_{11} в полосе частот и сохранения данных ПК отдает команду ОПУ на поворот объекта на заданный угол. Положение объекта в пространстве и расстояние до него контролируются геодезическим тахеометром Leica TCR 802 power.



Рис. 7 – Исследуемый объект в БЭК

Описание режима измерения моностатических ЭПР представлено в таблице 1.

Таблица 1. – Параметры измерительного стенда

Параметр	Значение	Примечание
Полоса частот ΔF , ГГц	4 – 15	
Поляризация поля	линейная	Вертикальная или горизонтальная
Расстояние до оси вращения цели, м	14,5	
Количество измеренных точек в полосе частот	3201	$\Delta f=5\text{МГц}$ – дискрет частотного спектра
Ширина фильтра, кГц	1	
Временное окно, нс	0,9	
Излученная мощность, дБм	0	1 мВт
Измеряемый параметр	S11	коэффициент отражения
Дискрет при угловом вращении, град.	0,2; 0,5	для пластин; для уголковых отражателей
Основной эталон	Сфера диаметра 250 мм	
Оборудование		
Векторный анализатор цепей	Agilent E8363B	
Антенна измерительная	П6-23М	
Комплект коаксиальных переходов и кабелей		
Геодезический тахометр	Leica TCR 802 power	
Опорно-поворотное устройство	ОПУ-300	

Особенности работы во временной области с векторным анализатором цепей при измерении ЭПР. Для подавления отражений от стен, потолка и пола БЭК, а также вспомогательной оснастки, используется режим временной селекции отраженного сигнала [9]. Выполняется серия из трех преобразований принятого сигнала (S11) с помощью встроенных функций векторного анализатора цепей: из частотной области во временную (Transform), применение временного окна (Gating), с последующим переходом из временной области в частотную.

Преобразование во временную область. Обратное оконное преобразование Фурье спектра, накопленного за время свипирования принятого сигнала, выполняется с применением оконной функции Кайзера с параметром β . Окно Кайзера представлено выражением (9). Для снижения влияния соседних откликов на результат измерения выбрано окно Кайзера с $\beta=10,4$, обеспечивающее УБЛ=-77,3дБ.

$$W(n) = \frac{\left| I_0 \left(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n - N + 1}{N - 1} \right)^2} \right) \right|}{|I_0(\beta)|}, \quad (9)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;
 β – коэффициент, определяющий долю энергии, сосредоточенной в главном лепестке спектра оконной функции;
 N – количество отсчетов;
 n – номер отсчета.

Таблица 2. – Характеристики оконной функции Кайзера

Параметр	Значение параметра		Описание
	$\beta=6$	$\beta=10,4$	
УБЛ, дБ	-44	-77,3	определяет вклад соседних откликов на исследуемый отклик
Ширина главного лепестка окна по уровню -6дБ, с	1,95/ ΔF	2,9/ ΔF	определяет разрешающую способность измерительного стенда во временной области
Осцилляции вершины окна, дБ	$\pm 0,1$ дБ		источник погрешности преобразования

Примечание: если не использовать какую-либо оконную функцию, то преобразование во временную область по умолчанию пройдет с ограниченным спектром, то есть с прямоугольным временным окном, УБЛ которого -13,2 дБ, что не обеспечит качественного подавления помеховых сигналов.

Выбор границы временного окна (функция Gating). Положение отклика от объекта во временной шкале определяется исходя из габаритов объекта и его положения при вращении во время измерения моностатического ЭПР. Временное окно (Gating) является полосовым фильтром во временной области, его характеристики представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Характеристики оконной функции, примененной к сигналу во временной области

Параметр	Значение	Описание
УБЛ, дБ	-68	определяет уровень вклада соседних составляющих частотного спектра
Ширина главного лепестка окна по уровню -6дБ, с	$2,8/\Delta F$	определяет длительность фронтов временного фильтра
Ширина главного лепестка окна по нулевому уровню, с	$5,6/\Delta F$	
Осцилляции вершины окна, дБ	$\pm 0,1$ дБ	источник погрешности преобразования

4. Экспериментальное определение ЭПР

Проведена серия экспериментов с целью определения возможностей измерительного стенда. В таблицах 4 – 5 представлены расчетные параметры измерительного стенда.

Таблица 4. – Характеристики преобразования во временной области

Параметр	Значение	Примечание
Разрешающая способность, нс	$2,9/\Delta F=0,18$	Разрешение по расстоянию $0,18 \text{ нс} \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 27 \text{ мм}$
Период неоднозначности, нс	$1/\Delta f=200$	Неоднозначность по расстоянию с периодом $200 \text{ нс} \cdot 1,5 \cdot 10^8 \text{ м/с} = 30 \text{ м}$
Начало плоской вершины временного фильтра, нс	$t_{\text{gate_start}}+2,8/\Delta F=$ $t_{\text{gate_start}}+0,18$	
Конец плоской вершины временного фильтра, нс	$t_{\text{gate_stop}}-2,8/\Delta F=$ $t_{\text{gate_stop}}-0,18$	

Минимальное расстояние R_{\min} до объекта измерения определяется выражением (10) согласно [2].

$$R_{\min} = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \Delta\phi \cdot \lambda}, \quad (10)$$

где $\Delta\phi = \pi/8$ – максимальная ошибка фазы на краю исследуемого объекта;

D – диаметр исследуемого объекта.

Таблица 5. – Зависимость максимальной частоты, на которых выполняется условие дальней зона для объектов на расстоянии 14,5 м, от габаритов объекта

Диаметр объекта, м	Длина волны, мм	Частота, ГГц
0,5	34	8,8
0,358	18	17
0,3	12,4	24
0,25	8,6	35

На рис. 8-9 представлены изображения с монитора векторного анализатора цепей. Верхний график – временная область, нижний – частотная область после применения фильтрации временным окном шириной 0,9 нс. Рис. 8 – при отсутствии целей в безэховой камере, рис. 9 – при наличии сферы диаметром 250 мм.

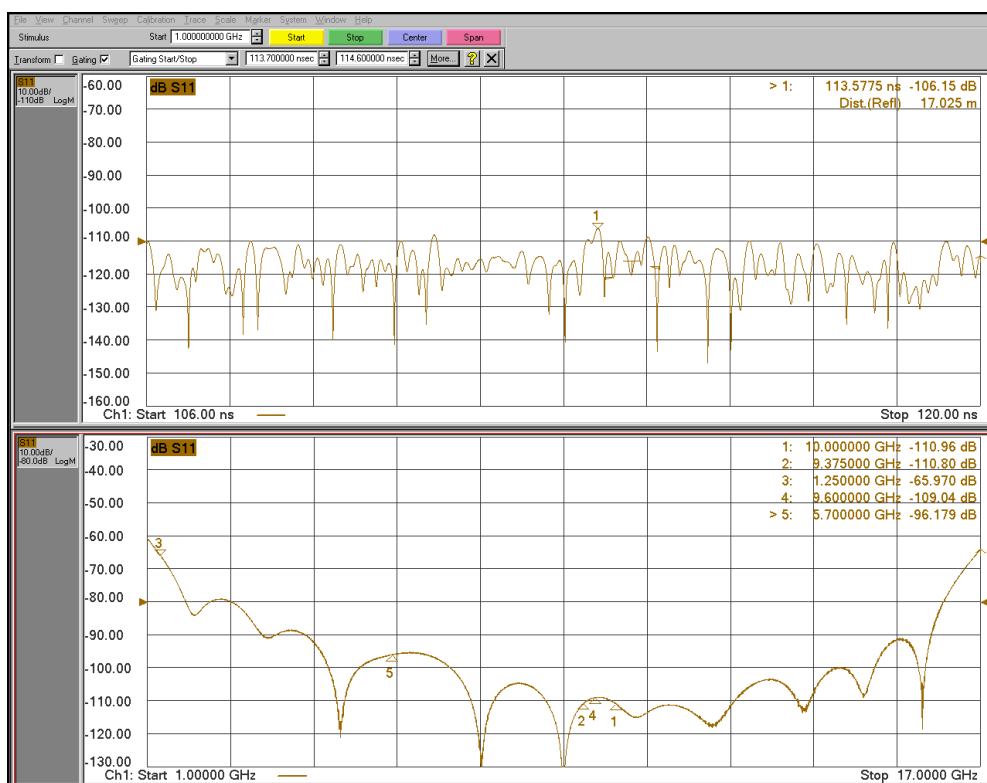


Рис. 8 – Коэффициент отражения при отсутствии целей: временная область (верх) и частотная область после применения окна (низ)

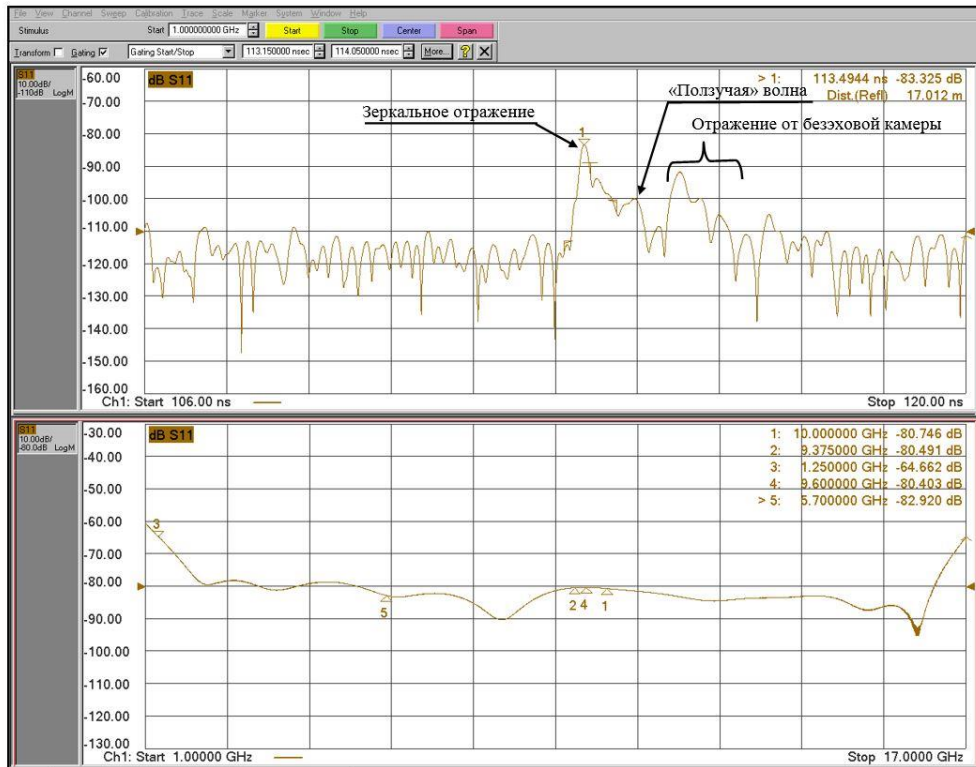


Рис. 9 – Коэффициент отражения со сферой диаметра 250 мм: временная область (верх) и частотная область после применения окна (низ)

В качестве эталона применена полая сфера диаметром 250 мм, изготовленная на ЧПУ станке из двух алюминиевых полусфер (рис. 10), расчетное ЭПР сферы в полосе частот представлено на рис. 11.



Рис. 10 – Полая сфера диаметром 250 мм

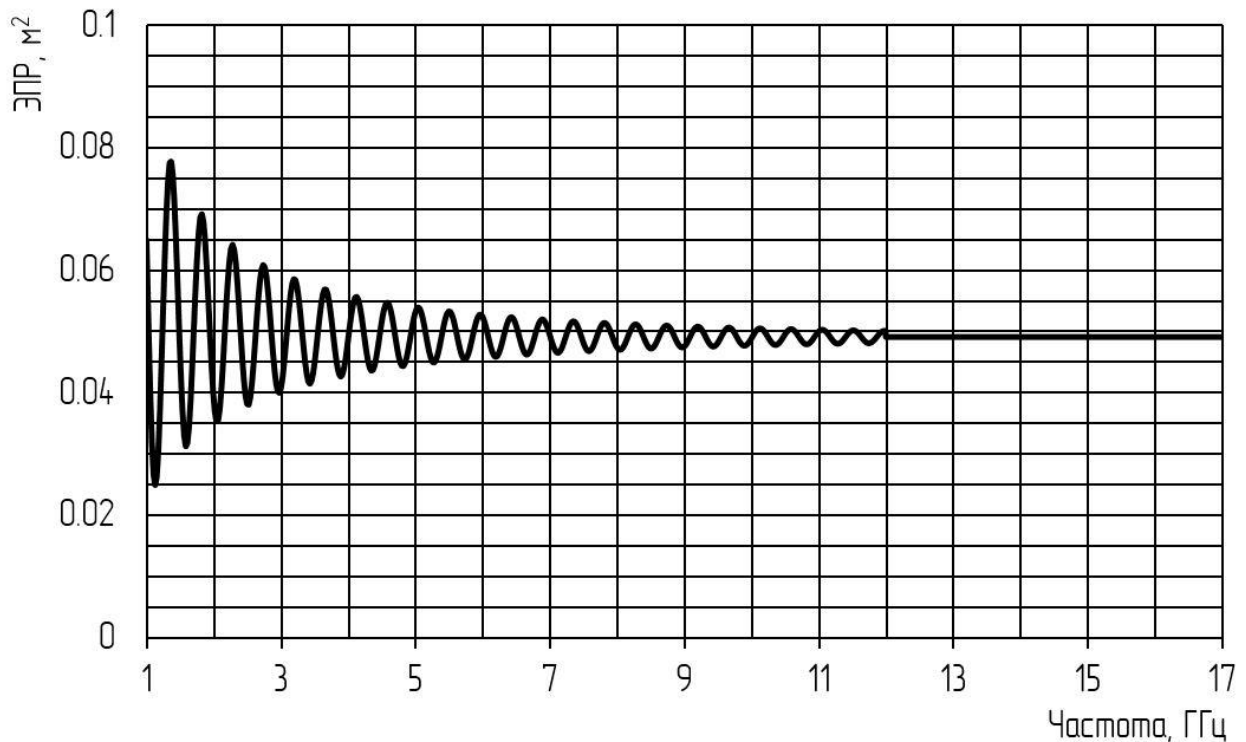


Рис. 11 – Теоретическое ЭПР сферы диаметра 250 мм

На рисунках 12-14 представлены графики измеренных значений ЭПР шара диаметра 100 мм с эталонной сферой диаметра 250 мм при различных состояниях стенда (см. таблицу 6). Вклад фона низкий, поэтому его вычитание большого выигрышам не даёт.

Таблица 6. – Режимы измерения ЭПР шара диаметра 100 мм

Рисунок	Объект	Временное окно, нс	Вычитание фона
12	Шар диаметра 100 мм	0,9 (112,9-113,8)	да
	Сфера диаметра 250 мм	1,5 (113,15-114,65)	да
13	Шар диаметра 100 мм	0,9 (112,9-113,8)	нет
	Сфера диаметра 250 мм	0,9 (113,15-114,05)	нет
14	Шар диаметра 100 мм	0,9 (112,9-113,8)	да
	Сфера диаметра 250 мм	0,9 (113,15-114,05)	да

Наилучший результат получается при сохранении длительности временного окна одинаковым, что объясняется особенностью преобразований из временной области в частотную при котором нормировочные коэффициенты меняются в зависимости от ширины окна.

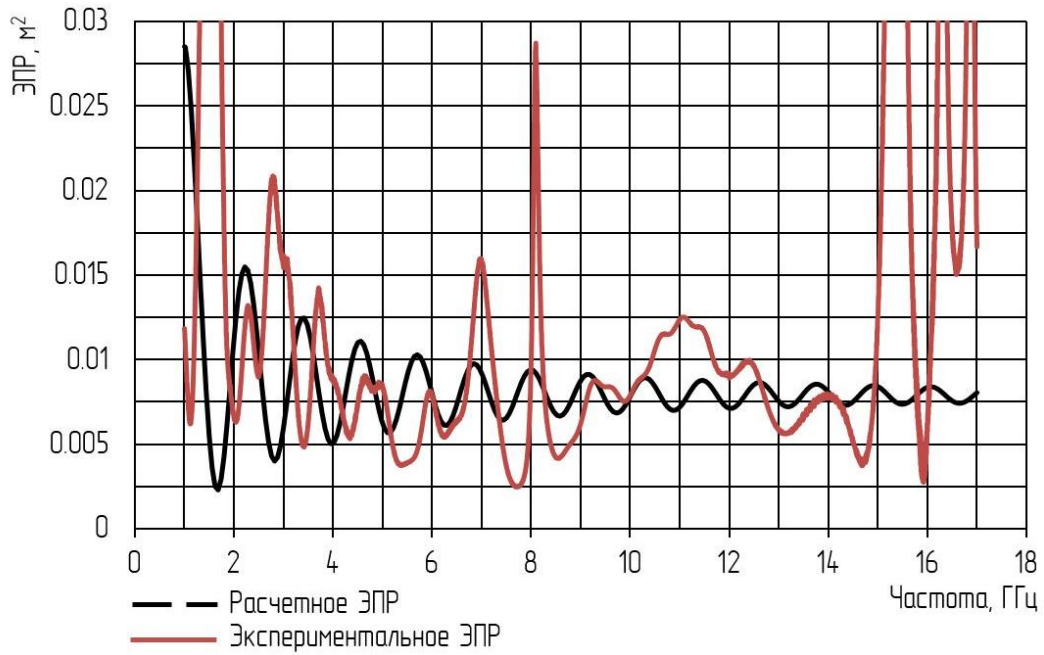


Рис. 12 – ЭПР шара диаметром 100 мм в полосе частот от 1 до 17 ГГц при вычитании фона и временном окне шара 0,9 нс, эталонной сферы 1,5 нс

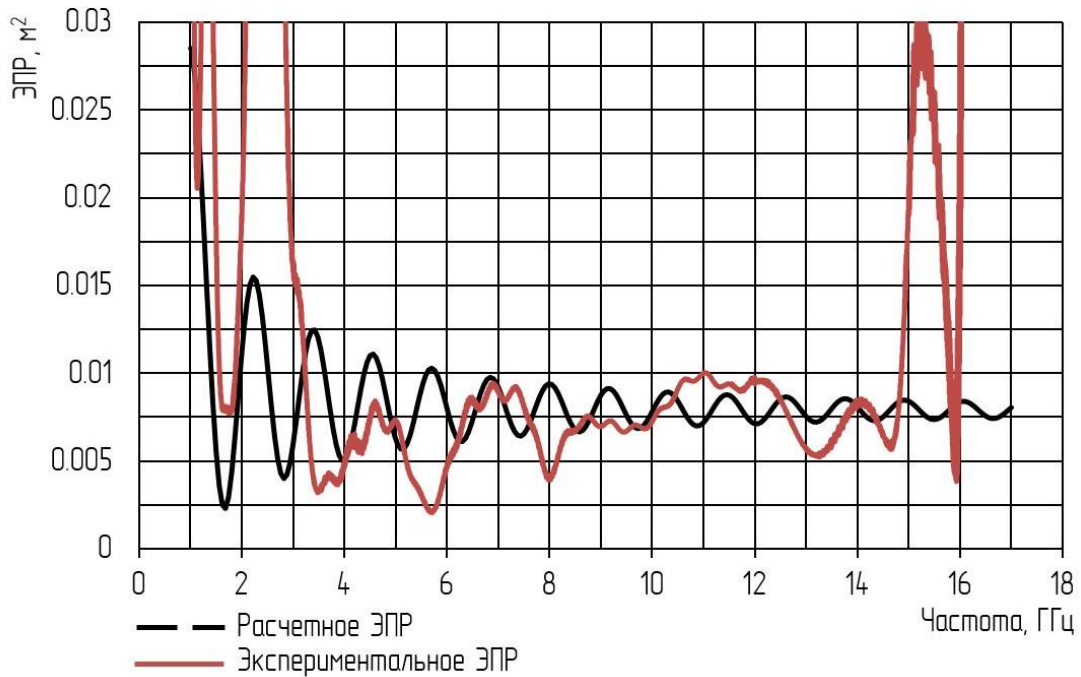


Рис. 13 – ЭПР шара диаметром 100 мм в полосе частот от 1 до 17 ГГц без вычитания фона и временном окне шара 0,9 нс, эталонной сферы 0,9 нс

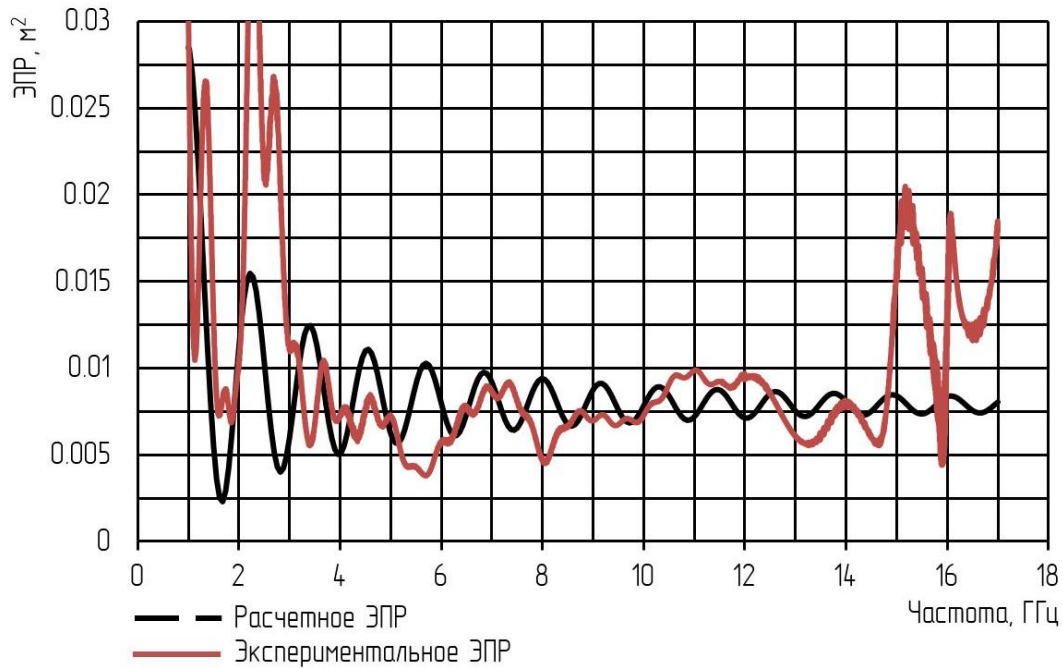


Рис. 14 – ЭПР шара диаметром 100 мм в полосе частот от 1 до 17 ГГц при вычитании фона и временном окне шара 0,9 нс, эталонной сферы 0,9 нс

На основе проведенных экспериментов сделаны следующие выводы.

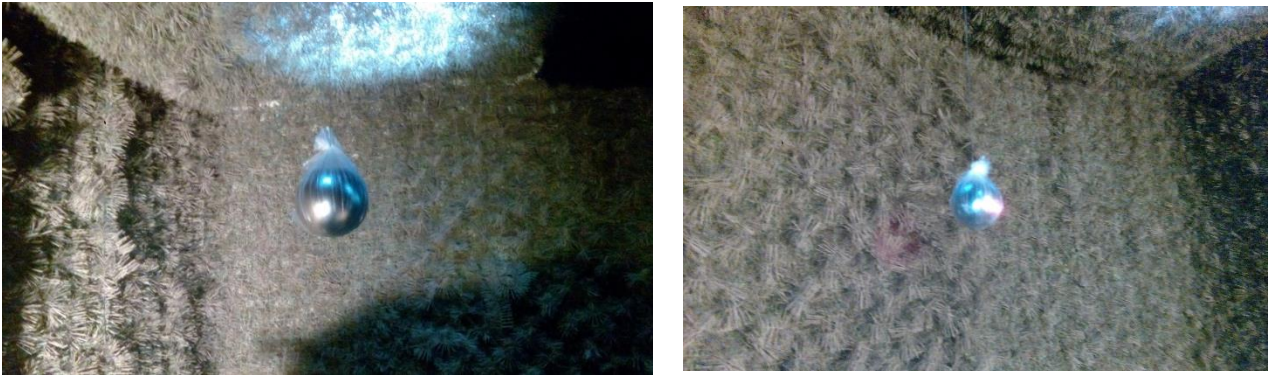
1. Длительность и параметры временного окна для исследуемого объекта и эталона должны быть одинаковы, во избежание ошибок, связанных с особенностями нормировки при преобразовании из временной области в частотную.

2. Длительность временного окна для предложенного стенда не должна превышать 1,3 нс для исключения переотражений от передней части объекта, стен и потолка БЭК. То есть ограничение на продольный размер отражающей части исследуемого объекта 20 см.

3. Наличие звона, возникающего из-за преобразований, не позволяет использовать начало и конец частотного спектра, поэтому при измерении в полосе частот от 1 до 17 ГГц корректные значения получаются в полосе от 4 до 15 ГГц.

5. Экспериментальное сравнение ЭПР сферических объектов разного диаметра

На рис. 15 представлены стальные шары диаметром 100 мм и 50 мм из конструкционной подшипниковой стали ШХ15 массой 4 и 0,5 кг соответственно. Результаты измерения ЭПР шаров представлены на рис. 16-17



а)

б)

Рис. 15 – стальной шар диаметром 100 мм (а) и стальной шар диаметром 50 мм (б)

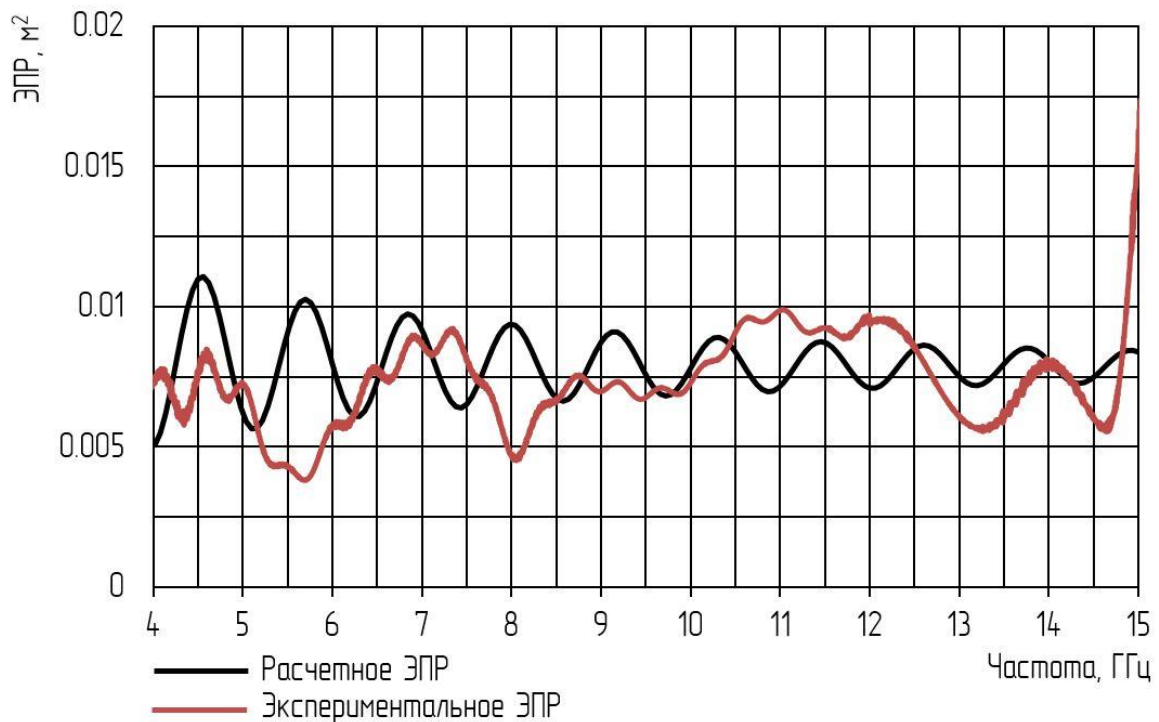


Рис. 16 – ЭПР шара диаметра 100 мм в полосе частот

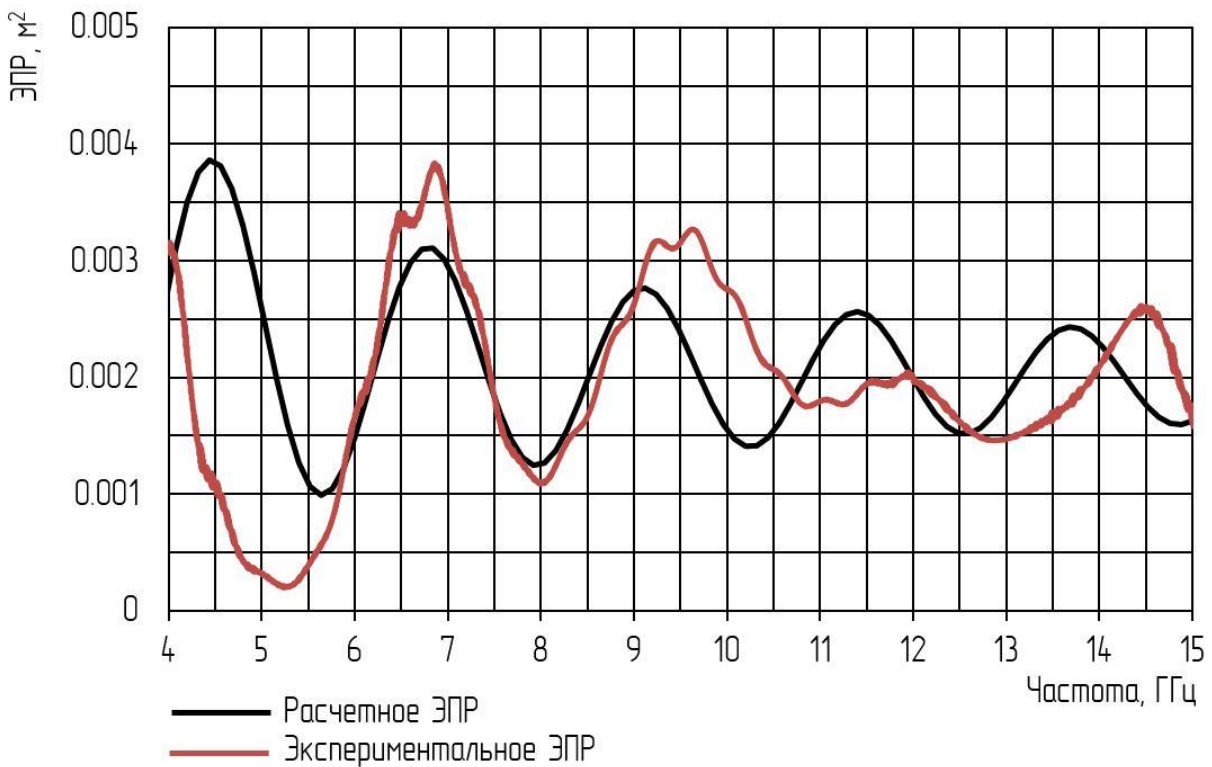


Рис. 17 – ЭПР шара диаметра 50 мм в полосе частот

Результаты эксперимента сферы диаметром 300мм из пластика с проводящим покрытием и сферы, покрытой серебрянкой (рис. 18) представлены на рис. 19, эталон-сфера 250 мм.



а)



б)

Рис 18 – сфера диаметром: 300 мм с проводящим покрытием (а) и покрытая серебрянкой (б)

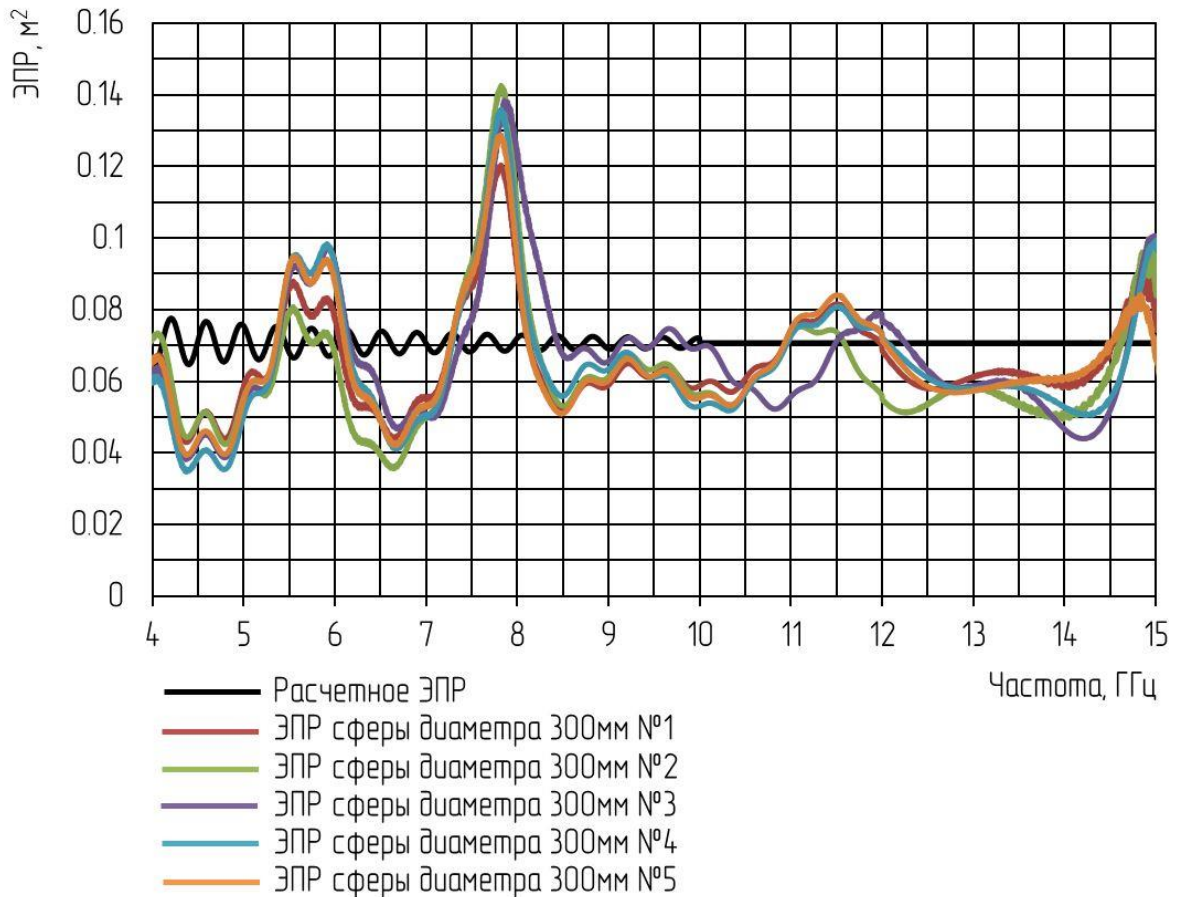


Рисунок 19 – ЭПР сфер диаметра 300 мм

В результате обработки эксперимента и сравнение данных с теоретическими можно сделать вывод:

1. Заводское покрытие сфер обеспечивает хорошее отражение электромагнитных волн, так как графики расчётных и экспериментальных ЭПР близки по значениям.
2. Сильный разброс значений относительно расчётного объясняется следующими причинами:
 - а) точностью изготовления шара (диаметр и сферичность).
 - б) значительный вклад в ЭПР вносит так же элемент крепления шара.
3. Стоит отметить высокую повторяемость характеристик рассеяния пяти шаров. Шар, который был покрыт серебрянкой показал схожие результаты с небольшим отклонением характеристик от остальной группы шаров.

6. Измерение моностатических ЭПР угловых отражателей и пластин

В разработанном измерительном стенде наличие опрно-поворотного устройства позволяет измерять моностатические и бистатические ЭПР объектов. В рамках данной работы измерены моностатические ЭПР угловых отражателей, металлических пластин и специальных объектов.

Объект № 1: Угловый отражатель с треугольными гранями равными 243,2 мм из алюминиевого сплава Д16 (рис. 20). Результат измерения ЭПР представлен на рис. 21.



Рис. 20 – Угловый отражатель со стороной $a=243,2$ мм

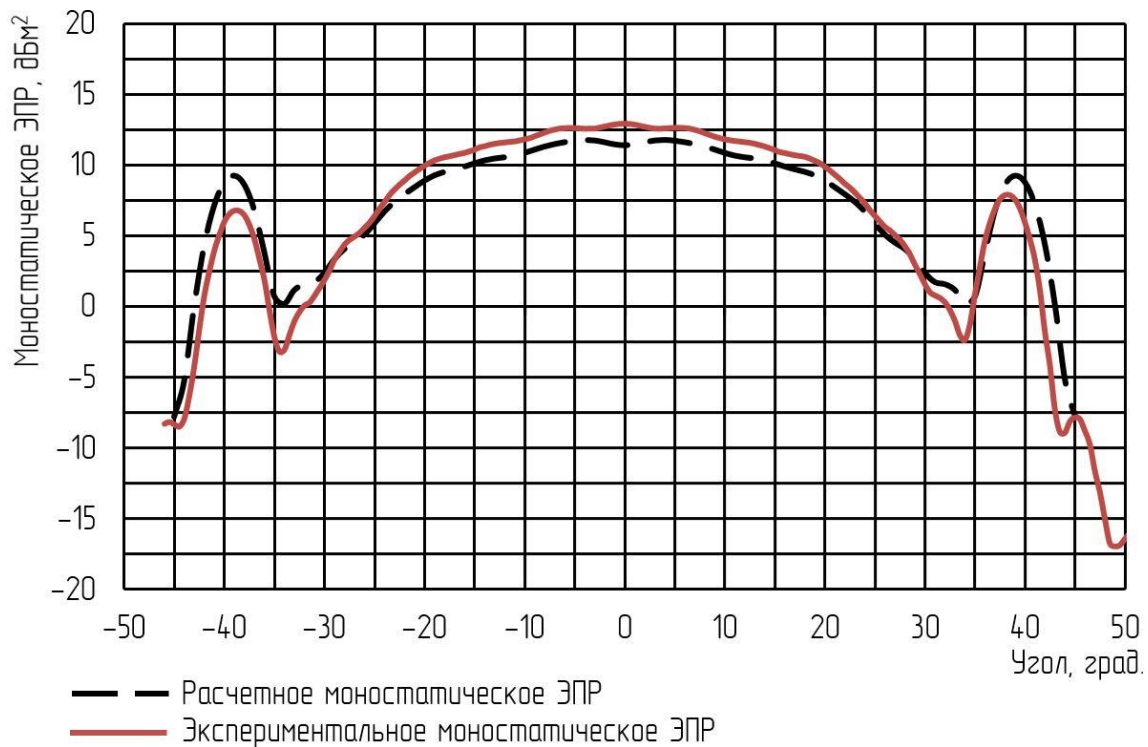


Рис. 21 – Моностатическое ЭПР углового отражателя с $a=243,2$ мм на частоте С-диапазона, горизонтальная поляризация поля

Объект № 2: Плоская треугольная пластина в виде равностороннего треугольника со стороной 200 мм из алюминия толщиной 2,7 мм. (рис. 22).
 Результат измерения представлен на рис. 23 – 24.

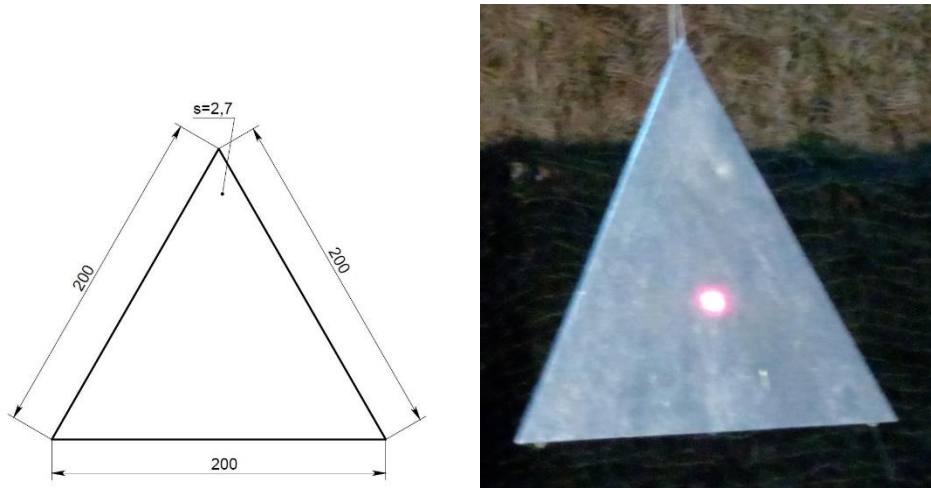


Рис. 22 – Плоская треугольная пластина со стороной $a=200$ мм

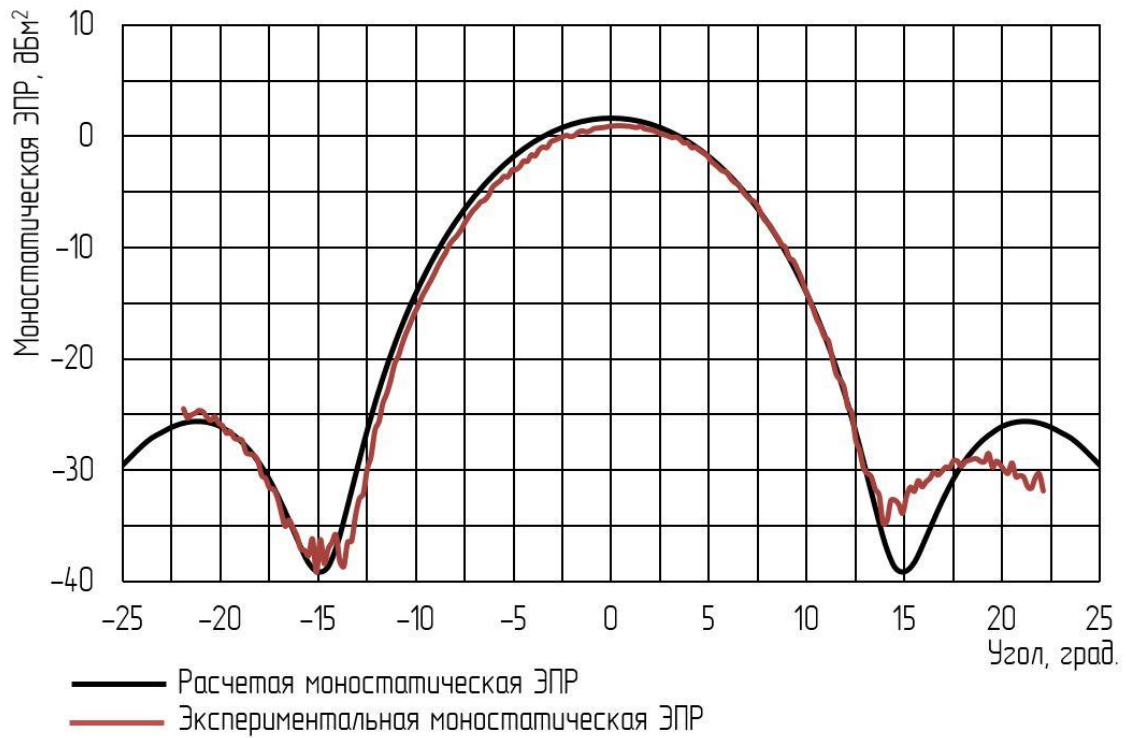


Рис. 23 – Моностатическая ЭПР треугольной пластины с $a=200$ мм на частоте С-диапазона, горизонтальная поляризация поля

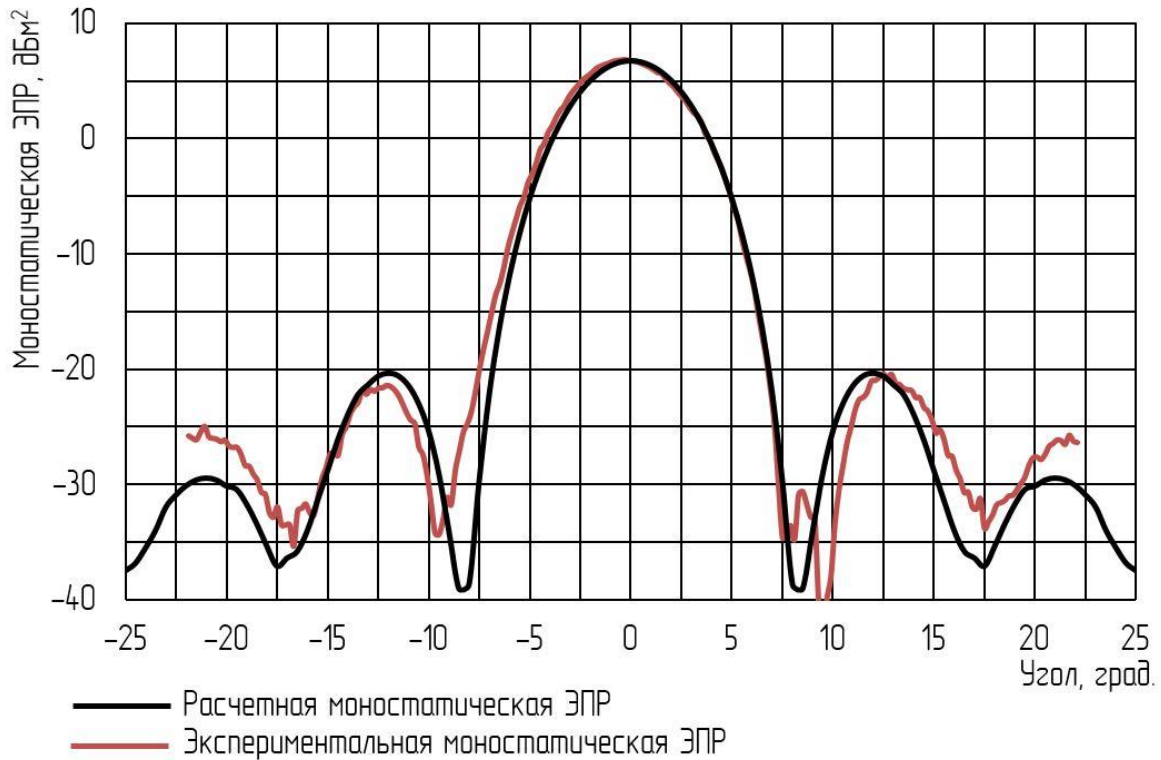


Рис. 24 – Моностатическая ЭПР треугольной пластины на частоте X-диапазона, горизонтальная поляризация поля

7. Заключение

В результате проделанных работ был разработан и апробирован автоматизированный лабораторный стенд для измерения характеристик рассеяния объектов. В качестве эталонного объекта была выбрана алюминиевая сфера диаметром 250 мм. Анализ экспериментальных и расчетных ЭПР различных объектов (шаров, сфер, уголкового отражателя и металлической пластины) позволяет сделать вывод о качественной работе стенда, предназначенного для измерения ЭПР в диапазоне частот от 4 до 15 ГГц с объектами диаметра не более 30 см. Измерены моностатические ЭПР уголкового отражателя и металлических пластин. В ходе работы описан и применен алгоритм обработки отраженных сигналов с применением временного окна и вычитанием фона.

Разработанный стенд применим для измерения моностатических ЭПР объектов, включающих в свой состав несколько компонент, совершающих качательные или вращательные движения, таких как МБПЛА.

Литература

1. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. пособие / под ред. И.Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 846 с.
2. Скосырев В. Н. Повышение информативности радиолокационных систем на основе технологий сверхширокополосных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2012. №. 7. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul12/9/text.html>.
3. Слукин Г. П., Чапурский В. В. Пространственно многоканальные РЛС большой дальности с высокой разрешающей способностью // Радиотехника. – 2013. №. 11. С. 24-34.
4. Верба В. С., Татарский Б. Г., Майстренко Е. В. Новые технологии радиолокационного мониторинга земной поверхности для носителей вертолетного типа // Журнал радиоэлектроники. 2018. №. 2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/4/text.pdf>.
5. Jian M., Lu Z., Chen V. C. Experimental study on radar micro-Doppler signatures of unmanned aerial vehicles // 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), С. 0854-0857.
6. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от движущегося протяженного объекта // Журнал радиоэлектроники. 2015. №. 1. URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jan15/13/text.pdf>
7. Таранцев Е. К., Коннов Н. Н. Способы повышения производительности программно-аппаратных комплексов РЛС импульсно-доплеровского типа // Телекоммуникации. 2011. №. 5. С. 25-33.
8. Гандурин В. А., Кирсанов А. П. Особенности зоны обнаружения низколетящих воздушных объектов доплеровской радиолокационной станции // Радиотехника. 2007. №. 10. С. 42-46.
9. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио. 1975. 248 с.

10. Бачурин В. С., Деменёв А. Д., Пышный В. Д. Широкополосное измерение ЭПР методом частотно-временных преобразований // Журнал радиоэлектроники. 2010. №. 7. URL: <http://jre.cplire.ru/koi/jul10/6/text.html>

11. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеивания / под. общ. ред. Н.П. Балабухи. М.: Наука. 2007. 266 с.

12. Богданов О.А. Эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» // Радиоэлектронная борьба в Вооруженных Силах Российской Федерации. 2015. С. 90-91. URL: <https://reb.informost.ru/2015/pdf/34.pdf>

Для цитирования:

Э. О. Можаров, Н. К. Галкин. Калибровка широкополосного стенда для измерения характеристик рассеяния объектов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/11/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.11