

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.5

УДК 621.396

МЕТОДИКА БЫСТРЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА СОВПАДАЮЩИХ И КРОССОВЫХ ПОЛЯРИЗАЦИЯХ

В. С. Грибков

Центральный научно-исследовательской институт ВКС Минобороны России

Статья поступила в редакцию 24 января 2020 г.

Аннотация. В работе предложена методика быстрых измерений эффективной площади рассеяния радиолокационных объектов на совпадающих и кроссовых поляризациях в условиях открытого полигона с гибкой системой подвеса. Методика включает ускоренную калибровку основных каналов измерительных установок за счет использования специального отражателя и одновременное определение значений на кроссовых поляризациях с использованием калибровок основных каналов. Представлены экспериментальные и расчетные данные. Проведена оценка погрешности получаемых значений на кроссовой поляризации.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, калибровка, эталонный отражатель, кроссовая поляризация.

Abstract. In this work, we propose a technique for quick measurements of the effective scattering area of radar objects on coincident and cross polarizations in an open testing ground with a flexible suspension system. The methodology includes the accelerated calibration of the main channels of the measuring installations through the use of a special reflector and the simultaneous determination of values at cross polarizations using calibrations of the main channels. Experimental and calculated data are presented.

Key words: effective scattering area, calibration, reference reflector, cross polarization.

Высокоточные измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) габаритных (размеры более 3 м) малозаметных (значения ЭПР менее $0,1 \text{ м}^2$) радиолокационных объектов проводят, как правило, на полигонах открытого типа с гибкой системой подвеса. Влияние подстилающей поверхности

минимизируют за счет подъема объектов на высоту порядка 30 м и установки на земле отсекающих металлических экранов, а в системе подвеса применяют малоотражающие диэлектрические шнуры или тонкие арамидные тросы.

При этом используют метод относительных измерений, заключающийся в сравнении мощности импульсных сигналов, отраженных от исследуемых объектов, и сигналов, отраженных от эталонных отражателей (ЭО), ЭПР которых может быть рассчитана аналитически с высокой точностью.

Разрешив уравнение радиолокации [1] относительно ЭПР объекта, получим:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 \cdot S \cdot R^4 \cdot F^2 \cdot L_1 \cdot L_2}{P \cdot G^2 \cdot \lambda^2}, \quad (1)$$

где σ – ЭПР объекта;

S – мощность принятого сигнала;

R – расстояние до объекта;

F – коэффициент, учитывающий ослабление электромагнитной волны при распространении в среде и влияние отражений от границ раздела на ее пути следования до объекта и обратно;

L_1 и L_2 – суммарные потери в антенно-фидерном тракте на передачу и прием соответственно;

P – мощность сигнала у объекта;

G – коэффициент усиления антенны;

λ – длина волны зондирующего сигнала.

Выражение (1) справедливо как для исследуемых радиолокационных объектов, так и для ЭО, поэтому:

$$\frac{\sigma_{ОБ}}{\sigma_{ЭТ}} = \frac{S_{ОБ}}{S_{ЭТ}} \cdot \frac{F_{ОБ}^2}{F_{ЭТ}^2} \cdot \left(\frac{R_{ОБ}}{R_{ЭТ}} \right)^4,$$

где индексы «ОБ» и «ЭТ» относятся к объекту и эталону соответственно.

При расположении объекта и ЭО в одной и той же точке пространства относительно измерительных установок (ИУ) получим:

$$F_{OB} = F_{ЭГ}, R_{OB} = R_{ЭГ},$$

$$\sigma_{OB} = \sigma_{ЭГ} \frac{S_{OB}}{S_{ЭГ}}.$$

Значения $\sigma_{ЭГ}$ рассчитывают аналитически методом собственных функций, а отношение $\frac{S_{OB}}{S_{ЭГ}}$ получают путем построения калибровочной характеристики ИУ. Для этого необходимо перекрыть с небольшим шагом весь динамический диапазон значений ЭПР объекта [2], включая нижние и верхние области, где имеют место соответственно фоновые отражения и насыщение приемника (рис. 1), т.е. затратить время на проведение измерений ЭПР большого числа ЭО.

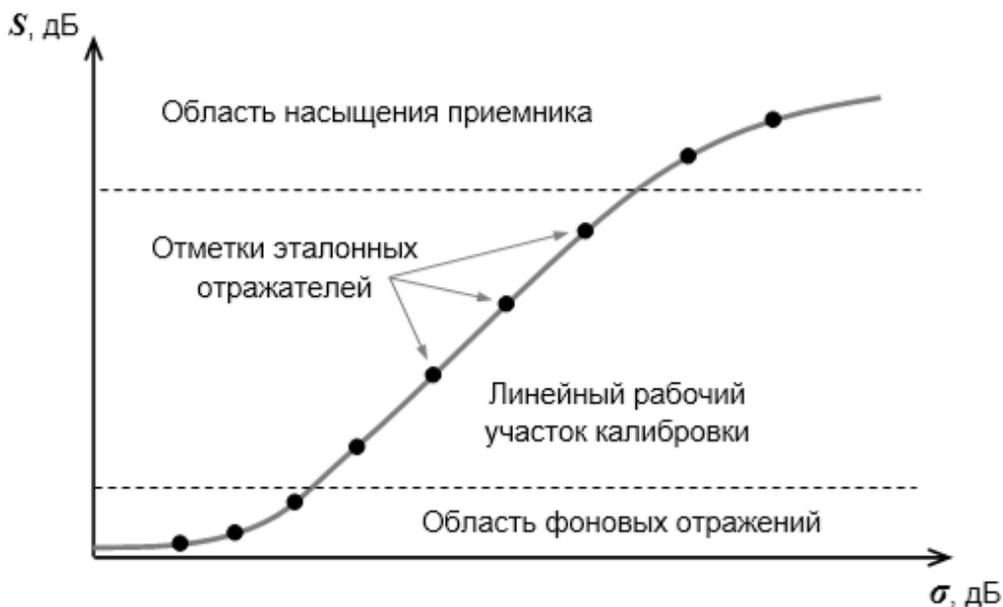


Рис. 1. Пример калибровочной кривой.

Значительные трудности представляет также калибровка кроссовых составляющих отраженного сигнала, так как все известные деполаризующие ЭО требуют точной ориентации, недостижимой при использовании гибкой системы подвеса.

Это определяет цель работы – сократить время измерения ЭПР радиолокационных объектов на совпадающих поляризациях и одновременно обеспечить возможность определения их ЭПР на кроссовых поляризациях с той же точностью.

В процессе измерения ЭПР объектов для перекрытия всего диапазона ее изменений на практике используют 9-12 металлических ЭО, включая 6-8 сфер и 3-4 цилиндра. Калибровка основных измерительных каналов применительно к полигонам открытого типа занимает не менее 40 минут, причем значительная часть этого времени тратится на измерения цилиндров. Сокращение времени калибровки за счет использования меньшего числа ЭО приводит к существенному снижению точности измерений.

Кроссовые каналы эталонными сферами и цилиндрами не калибруются, так как в отраженных ими сигналах отсутствуют кроссовые составляющие.

Это предопределяет задачу работы, состоящую в разработке методики, обеспечивающей сокращение времени калибровки основных измерительных каналов и одновременное определение кроссовых значений ЭПР радиолокационных объектов.

Предлагается сократить время калибровки, заменив эталонные цилиндры одним отражателем электромагнитных волн, образованным соединением поверхностей минимум 3-х металлических цилиндров с одинаковым диаметром основания d и разной длиной образующих l , лежащих в одной плоскости, как показано на рис. 2.

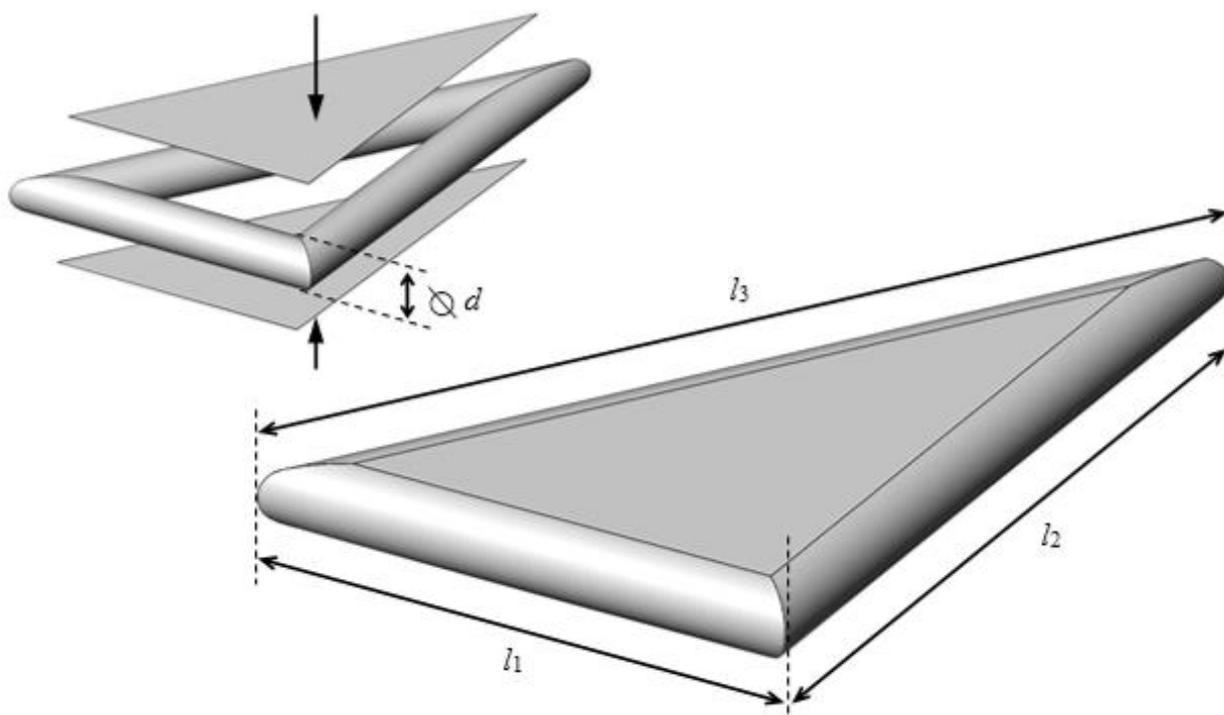


Рис. 2. Внешний вид отражателя электромагнитных волн.

При вращении предложенного отражателя вокруг центра массы в азимутальной плоскости, параллельной образующим всех цилиндров, максимальное значение его ЭПР (σ_{\max}) для каждой стороны в зависимости от длины волны определяется из выражения:

$$\sigma_{\max} = \frac{\pi \cdot d \cdot l_n^2}{\lambda}, \text{ где}$$

d – диаметр основания цилиндров;

l_n – длины образующих цилиндров (стороны отражателя), $n = 1, 2, 3 \dots$;

λ – длина волны зондирующего сигнала;

$\pi = 3,1415926 \dots$

Значения d и l выбираются из соотношения:

$$d \geq \bar{\lambda}, l \geq 4 \cdot \bar{\lambda}, \text{ где}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{(\lambda_{\min} + \lambda_{\max})}{2} - \text{среднее значение диапазона длин волн зондирующих}$$

сигналов;

λ_{\min} и λ_{\max} – соответственно минимальная и максимальная длина волны.

На рис. 3 представлено сравнение измеренных на длине волны 3,1 см при горизонтальной поляризации фрагментов угловых диаграмм обратного отражения (ДОО) эталонного цилиндра и одной из сторон предложенного отражателя, длина которой равна образующей этого цилиндра.

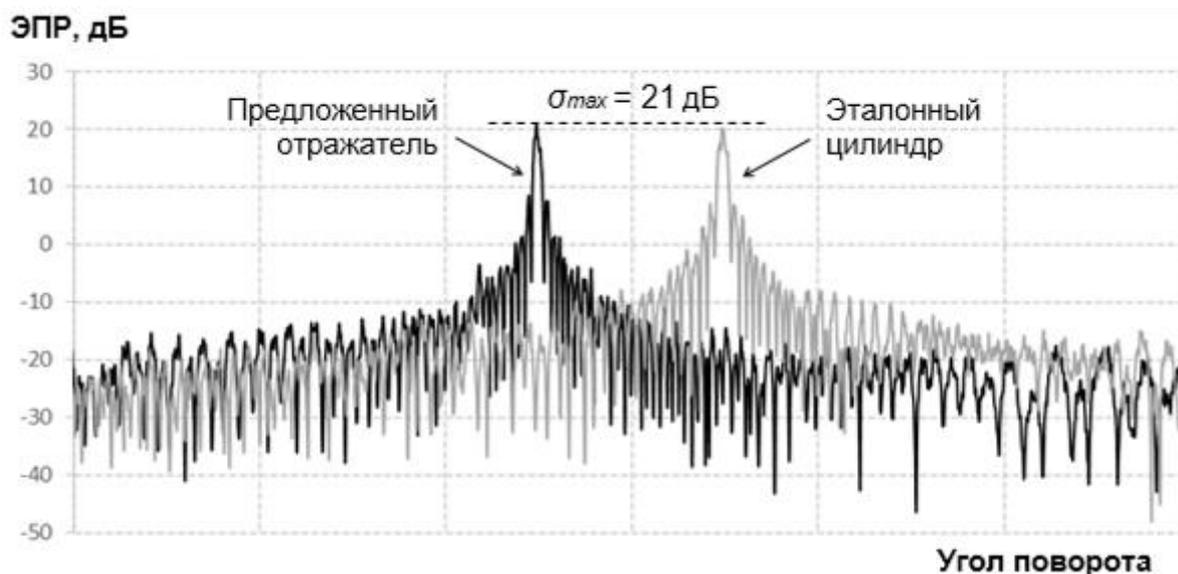


Рис. 3. Фрагменты диаграмм обратного отражения.

Анализ представленных графиков показывает их идентичность в пределах основного лепестка. Отличия максимальных значений ЭПР эталонного цилиндра и соответствующей ему по размеру стороны отражателя не превышают 0,1 дБ.

Использование предложенного отражателя сокращает до 3-х раз время проведения калибровки основных каналов ИУ, не ухудшая точности результатов.

В отличие от калибровки основных измерительных каналов калибровка кроссовых в условиях полигонов открытого типа с гибкой системой подвеса до настоящего времени не отработана. Основной причиной является отсутствие подходящих деполяризующих ЭО.

Известно, например, что металлический двухгранный уголкового отражатель с прямым углом между гранями, направленный раскрывом на ИУ и расположенный под углом 45° или 135° к азимутальной плоскости (рис. 4 а), а также аналогично расположенный металлический стержень (рис. 4 б), поворачивают плоскость поляризации отраженной волны на 90° [2, 3, 4].

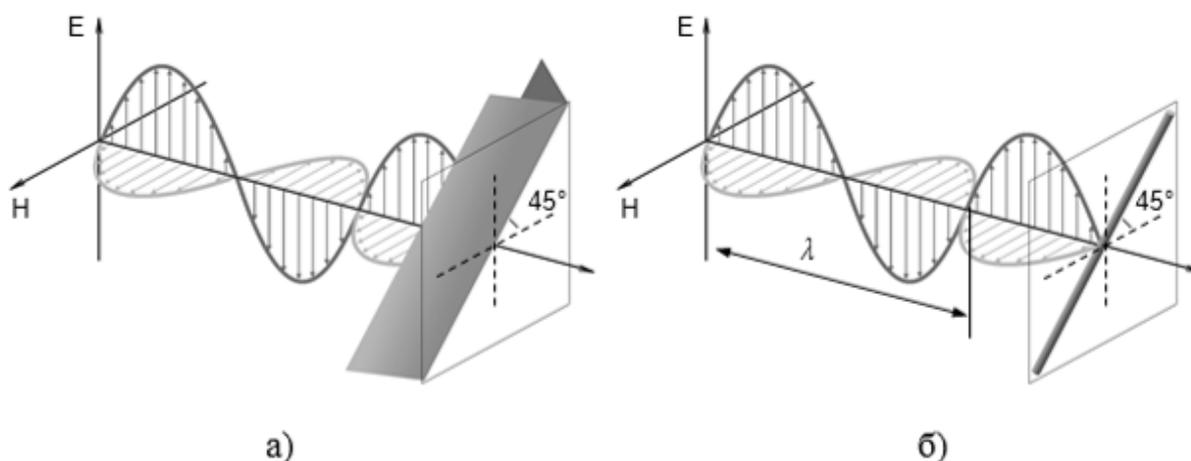


Рис. 4. Пример расположения деполяризующих отражателей.

При этом ошибка в ориентации этих ЭО на 1° приводит к изменению кроссовых значений их ЭПР в пределах основных лепестков ДОО до 2 дБ, ошибка на 2° – более 3 дБ.

Установка на гибком подвесе каждого деполяризующего ЭО с контролируемой угловой погрешностью порядка 1° в условиях открытого

полигона требует недопустимо больших временных затрат (час и более), что практически исключает возможность прямой калибровки кроссовых каналов.

Для определения кроссовых значений ЭПР радиолокационных объектов в условиях открытого полигона предлагается использовать уже полученные калибровки основных каналов ИУ и принцип взаимности, согласно которому значения ЭПР металлического объекта на кроссовых поляризациях при распространении сигнала в изотропной среде равны между собой [4].

Согласно (1), регистрируемый на совпадающих поляризациях отраженный от объекта сигнал в случае линейных трактов приема-передачи можно записать в виде:

$$\begin{aligned} S_{\Gamma\Gamma} &= P_{\Gamma} \cdot K_{\Gamma} \cdot \sigma_{\Gamma\Gamma}, \\ S_{\text{ВВ}} &= P_{\text{В}} \cdot K_{\text{В}} \cdot \sigma_{\text{ВВ}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $S_{\Gamma\Gamma}$ и $S_{\text{ВВ}}$ – мощности принимаемых сигналов на горизонтальной и вертикальной поляризациях;

P_{Γ} и $P_{\text{В}}$ – мощность передатчика на горизонтальной и вертикальной поляризациях (с учетом коэффициентов усиления передающих антенн);

K_{Γ} и $K_{\text{В}}$ – коэффициенты передачи (потенциалы) приемных трактов на горизонтальной и вертикальной поляризациях (с учетом коэффициентов усиления приемных антенн);

$\sigma_{\Gamma\Gamma}$ и $\sigma_{\text{ВВ}}$ – ЭПР объекта на совпадающих горизонтальной и вертикальной поляризациях.

Запишем амплитудные калибровки на совпадающих горизонтальной и вертикальной поляризациях в виде соответствующих функций:

$$\begin{aligned} f_{\Gamma\Gamma}(x) &= k_{\Gamma\Gamma} x, \\ f_{\text{ВВ}}(x) &= k_{\text{ВВ}} x, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} k_{\Gamma\Gamma} &= \frac{1}{P_{\Gamma} \cdot K_{\Gamma}}, \\ k_{\text{ВВ}} &= \frac{1}{P_{\text{В}} \cdot K_{\text{В}}}, \end{aligned} \quad (4)$$

так, что $\sigma_{ГГ} = f_{ГГ}(S_{ГГ})$ и $\sigma_{ВВ} = f_{ВВ}(S_{ВВ})$.

Заметим, что в силу отличий характеристик трактов приема и передачи ИУ калибровочные кривые основных каналов обычно не совпадают, как показано на рис. 5.

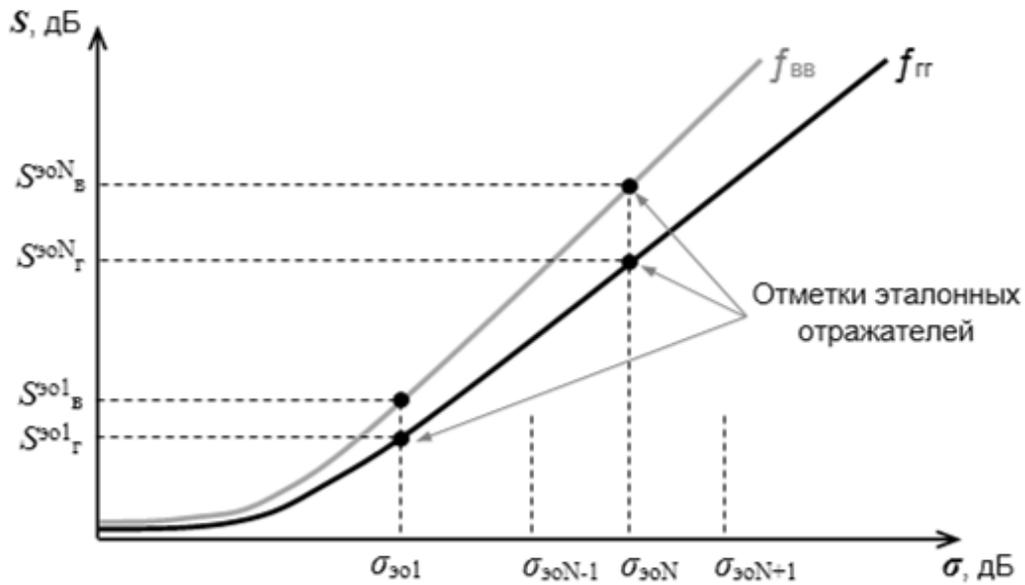


Рис. 5. Фрагменты калибровочных кривых основных каналов ИУ.

Аналогично (2) запишем регистрируемый сигнал на кроссовых поляризациях:

$$\begin{aligned} S_{ГВ} &= P_{Г} \cdot K_{В} \cdot \sigma_{ГВ}, \\ S_{ВГ} &= P_{В} \cdot K_{Г} \cdot \sigma_{ВГ}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $S_{ГВ}$ и $S_{ВГ}$ – мощности принимаемых сигналов на горизонтальной и вертикальной поляризациях при излучении на вертикальной и горизонтальной соответственно;

$\sigma_{ГВ}$ и $\sigma_{ВГ}$ – ЭПР объекта на кроссовых поляризациях.

Согласно (3)-(5) имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_{ГВ} &= \frac{S_{ГВ}}{P_{Г} \cdot K_{В}}, \quad \sigma_{ВГ} = \frac{S_{ВГ}}{P_{В} \cdot K_{Г}}, \\ \sqrt{\sigma_{ГВ} \cdot \sigma_{ВГ}} &= \sqrt{\frac{S_{ГВ}}{P_{Г} \cdot K_{В}} \cdot \frac{S_{ВГ}}{P_{В} \cdot K_{Г}}} = \sqrt{k_{ГГ} \cdot S_{ГВ} \cdot k_{ВВ} \cdot S_{ВГ}} = \\ &= \sqrt{f_{ГГ}(S_{ГВ}) \cdot f_{ВВ}(S_{ВГ})}. \end{aligned}$$

На рис. 7 сопоставлены измеренная согласно предлагаемой методике на длине волны 23 см при кроссовой поляризации в условиях Эталонного радиолокационного измерительного комплекса «ЭРИК-1» [5] угловая ДОО металлического стержня диаметром 0,012 м и длиной 2 м, расположенного под углом 45° к плоскости вращения, и его расчетная ДОО, полученная с помощью строгого решения программы электродинамического моделирования CST [6] при разбиении цифровой 3D-модели с шагом $\lambda/10$. Угол локации 0° соответствует нормали к оси стержня, при этом вектор \vec{E} падающей волны ориентирован к этой оси под углом 45° .

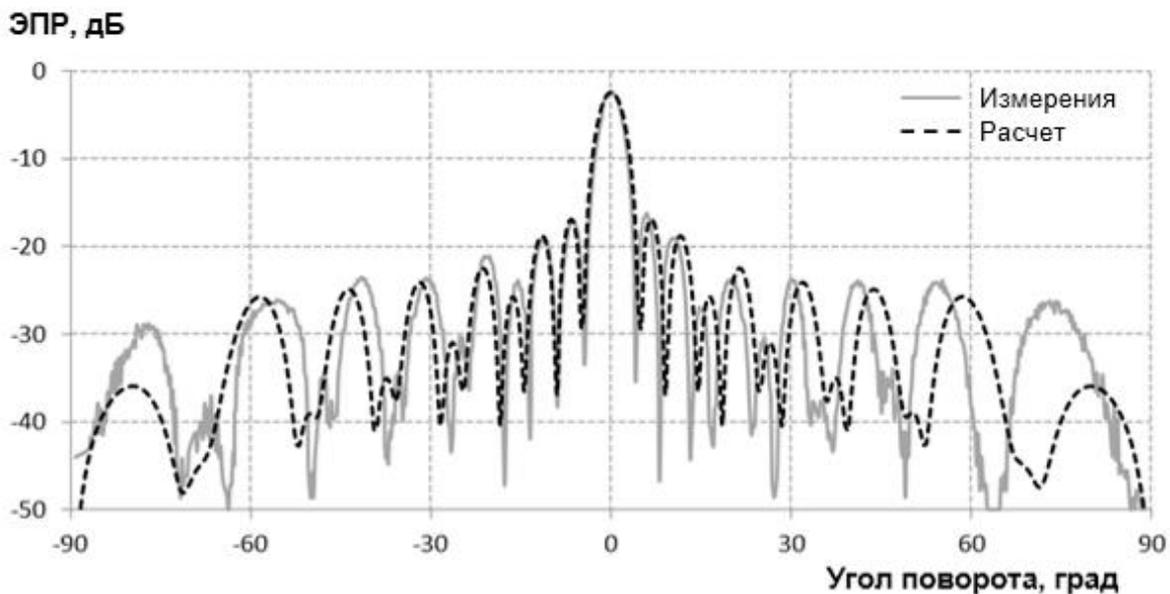


Рис. 7. Сравнение диаграмм обратного отражения.

Разница измеренных и расчетных максимальных значений ЭПР стержня на кроссовых поляризациях в пределах основных лепестков ДОО не превышает 0,1 дБ. Наблюдается совпадение лепестковой структуры по амплитуде, и небольшое расхождение по фазе, что объясняется возможными ошибками расчета и измерений (неравномерность вращения, влияние фона и др.). Отметим, что время установки данного деполяризующего отражателя на гибкой системе подвеса при требуемой точности ориентации (отклонение не более 1°) составляет порядка одного часа.

Для оценки погрешности определения кроссовых значений ЭПР радиолокационных объектов предлагаемой методикой выберем несколько секторов измеренной и расчетной ДОО с похожей лепестковой структурой, как показано на рис. 8, и вычислим для каждого из них максимальные (σ_{max}) и медианные ($\sigma_{0,5}$) значения ЭПР стержня, а также их среднеквадратичное отклонение (СКО).

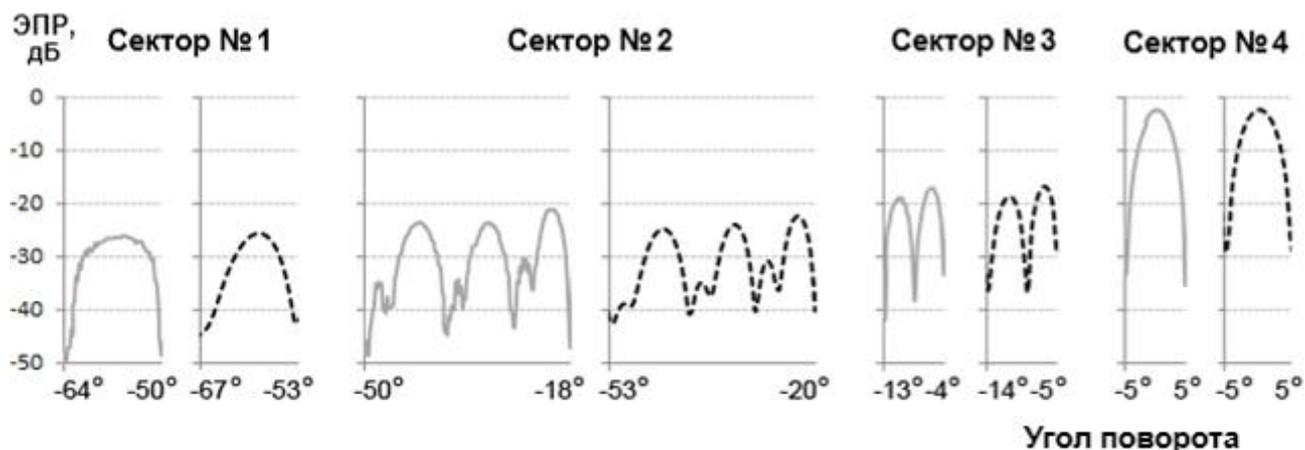


Рис. 8. Секторы диаграмм обратного отражения.

В таблице представлены данные статистической обработки измеренных и расчетных данных на кроссовой поляризации и оценка их отличий.

Сектор	Уровень ЭПР	Данные	Кроссовые характеристики ЭПР, дБ		
			σ_{max}	$\sigma_{0,5}$	СКО
№ 1	10^{-3} м^2	измерения	-26,06	-28,39	-30,67
		расчет	-25,73	-31,18	-30,17
		отличия	0,33	2,79	0,51
№ 2	$10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ м}^2$	измерения	-21,11	-30,01	-27,09
		расчет	-22,48	-30,96	-28,16
		отличия	1,37	0,95	1,07
№ 3	10^{-2} м^2	измерения	-17,12	-20,20	-22,26
		расчет	-16,98	-20,86	-21,99
		отличия	0,14	0,66	0,27
№ 4	1 м^2	измерения	-2,38	-6,40	-6,82
		расчет	-2,47	-6,91	-6,79
		отличия	0,09	0,51	0,03

Из данных таблицы следует, что погрешность определения предложенной методикой ЭПР радиолокационных объектов на кроссовой поляризации не превышает:

2 дБ – в диапазоне уровней ЭПР от 1 до 0,01 м²;

3 дБ – на уровне ЭПР 0,001 м².

Полученные оценки соответствуют поверенной погрешности измерений ЭПР объектов на комплексе «ЭРИК-1» на совпадающих горизонтальной и вертикальной поляризациях [7].

Таким образом, разработана методика быстрых измерений ЭПР радиолокационных объектов на совпадающих и кроссовых поляризациях в условиях открытого полигона с гибкой системой подвеса. Методика включает ускоренную до 3-х раз калибровку основных каналов ИУ за счет использования предложенного эталонного отражателя и одновременного определения значений ЭПР объектов на кроссовых поляризациях с погрешностью, соответствующей поверенной на совпадающих поляризациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-07-00026 А).

Литература

1. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем. Пер. с англ. под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Сов. радио, 1969.
2. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования. Монография / Под ред. С.М. Нестерова. - М.: Радиотехника, 2015.
3. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. Монография / Под ред. Н.П. Балабухи. – М.: Наука, 2007.
4. Радиолокационные отражатели. В.О. Кобак. – М.: Сов. радио, 1975.

5. Эталонный радиолокационный измерительный комплекс «ЭРИК-1» // Оружие и технологии России. Энциклопедия 21 век. Т. IX. Противовоздушная и противоракетная оборона. ИД «Оружие и технологии». 2005.
6. ST Dstudio Suite. Electromagnetic field simulation software [online]. Available at <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
7. Свидетельство о поверке «Комплекса радиолокационного измерительного ЭРИК-1». 2017.

Для цитирования:

Грибков В.С. Методика быстрых измерений эффективной площади рассеяния радиолокационных объектов на совпадающих и крестовых поляризациях. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/5/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.5