

## **Экспериментальные исследования во временной области отражательных характеристик октаэдрной компоновки трехгранных уголкового отражателей с секторными гранями**

© В.Г. Жирнов<sup>1</sup>, И.И. Лебедюк<sup>2</sup>, В.А. Макаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дмитровский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Дмитров,  
Московская область, 141801, Россия

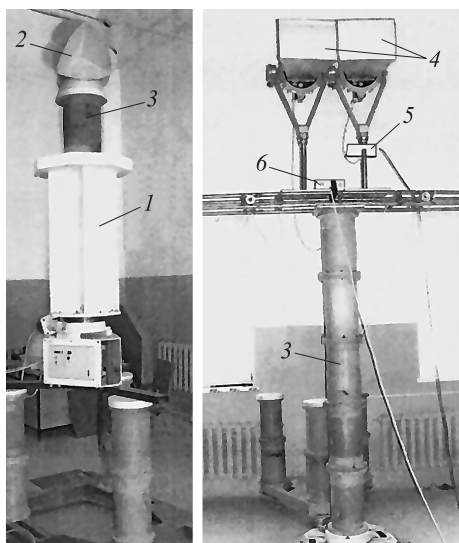
<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Приведены результаты экспериментальных исследований в широком диапазоне частот поляризационных индикатрис рассеяния октаэдрной компоновки трехгранных уголкового отражателей с секторными гранями, полученные во временной области с помощью установки для измерения параметров антенн в условиях бокса ограниченных размеров и безэховости. Выполнено сравнение результатов измерений во временной и частотной областях. Оценены метрологические возможности экспериментального стенда и рассмотрены пути их улучшения.*

**Ключевые слова:** индикатриса рассеяния, эффективная поверхность рассеяния, октаэдрная компоновка, трехгранные уголкового отражатели, секторные грани, сферический отражатель, поляризация.

В данной работе задачей исследований поляризационных индикатрис рассеяния октаэдрного отражателя в широком диапазоне частот с помощью установки для измерения параметров антенн во временной области является получение экспериментальных результатов и оценки метрологических возможностей этой установки при измерении отражательных характеристик радиолокационных целей во временной области с последующим преобразованием в частотную область.

Для решения поставленной задачи разработан экспериментальный стенд для радиолокационных измерений во временной области (рис. 1), основу которого составляет модифицированная установка для измерения параметров антенн в этой же области [1]. На опорно-поворотном устройстве (ОПУ) 1 размещен октаэдрный отражатель 2, установленный на слабоотражающей тонкостенной секции 3 из стеклопластика. На стойке из пяти таких же секций размещены приемная и передающая измерительные антенны П6-23А 4, которые могут перемещаться по направляющим с целью изменения бистатического угла. К антеннам подключены генератор пикосекундных импульсов 5 и стробоскопический преобразователь 6. Приемная и передающая антенны направлены в центр октаэдрного отражателя и расположены



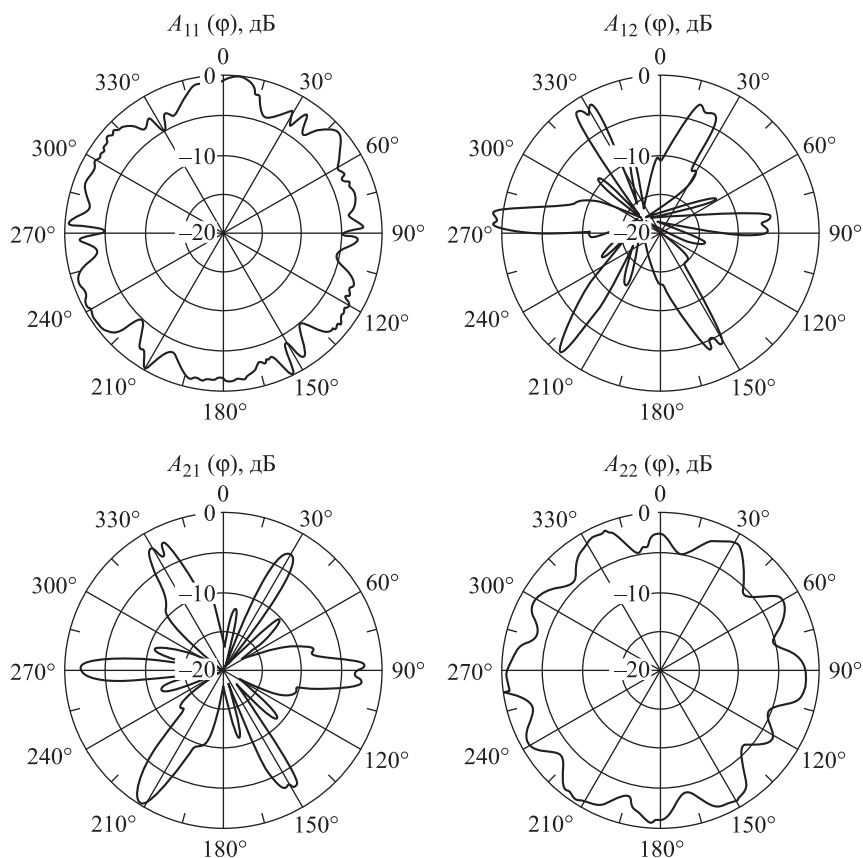
**Рис. 1.** Экспериментальный стенд для измерения отражательных характеристик радиолокационных целей во временной области:

1 — ОПУ; 2 — октаэдрный отражатель (компоновка из восьми трехгранных уголкового отражателей с секторными гранями); 3 — слабоотражающая тонкостенная секция; 4 — измерительные антенны П6-23А; 5 — генератор пикосекундных импульсов; 6 — стробоскопический преобразователь

на минимальном расстоянии друг от друга так, что измеряемые индикатрисы рассеяния могут считаться квазимоностатическими.

На рис. 2—6 приведены квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя на частотах 2, 3, 4, 8 и 10,5 ГГц на согласных вертикальной  $A_{11}$  и горизонтальной  $A_{22}$  поляризациях и на перекрестных горизонтальной  $A_{12}$  и вертикальной  $A_{21}$  поляризациях. Они получены при регистрации сигналов, отраженных от поворачиваемого на ОПУ октаэдрного отражателя, во временной области и их преобразовании в частотную область, в частности на приведенные выше частоты. Следует отметить, что на частотах 8 и 10,5 ГГц измерения не соответствуют условиям дальней зоны, однако их результаты вполне отвечают теоретическим представлениям о работе трехгранных уголкового отражателей с секторными гранями в групповой октаэдрной компоновке как на согласных, так и на перекрестных поляризациях [2].

Сравним поляризационные индикатрисы рассеяния, измеренные на частотах 2, 3, 4, 8 и 10,5 ГГц, с различными значениями  $2a/\lambda$ , соответственно равными 3,3; 5; 6,7; 13 и 17, где  $a$  — размер грани трехгранного уголкового отражателя, образующего октаэдрную компоновку;  $\lambda$  — длина волны на соответствующих частотах. В табл. 1 приведены экспериментальные значения ширины индикатрис рассеяния  $\Delta\varphi_i$  (5 дБ), где  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$  — порядковый номер лепестка, отсчитываемый от нулевого направления, а также средние максимальные значения  $A_{11}^{\max}$  и  $A_{22}^{\max}$  этих лепестков и их среднеквадратические отклонения (СКО), измеренные на согласных поляризациях при вращении вокруг оси, соответствующей размещению октаэдрно-



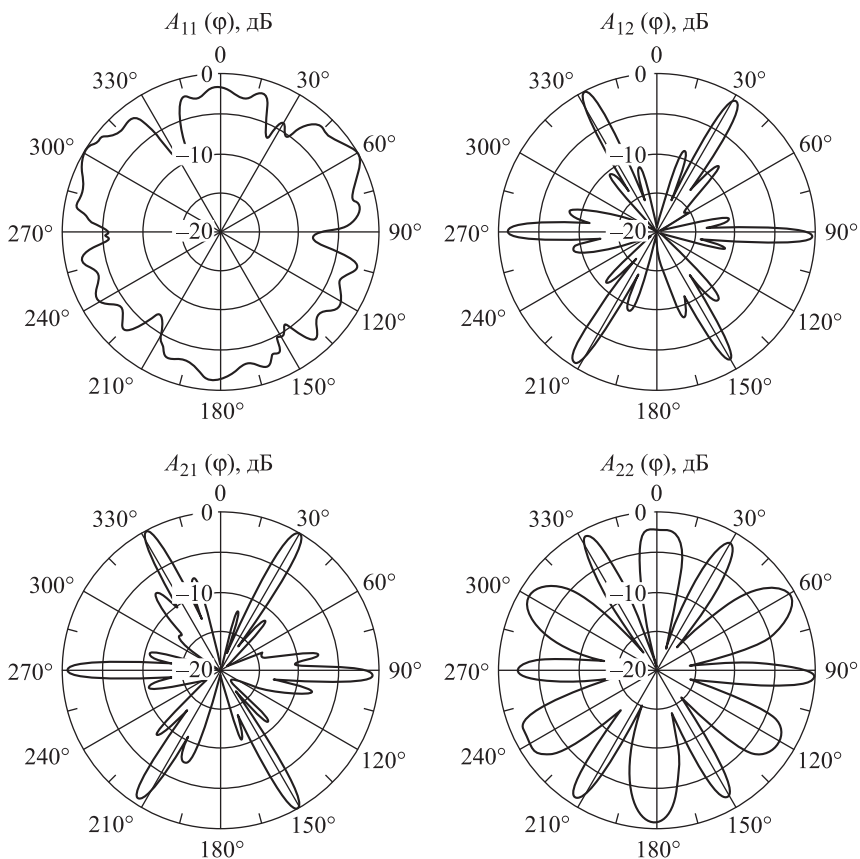
**Рис. 2.** Квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя с радиусом секторной грани 0,25 м на частоте 2 ГГц

го отражателя (см. рис. 1) для различных частот и соотношений  $2a/\lambda$ . Значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) каждого из восьми уголкового отражателей, образующих октаэдрную компоновку, рассчитаны по формуле [2]

$$\sigma_m = \frac{4,969\pi a^4}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_m$  — максимальные значения ЭПР при нулевом угле индикатрисы рассеяния для моностатических измерений (в данном случае квазимоностатических) также приведены в табл. 1.

Следует отметить, что октаэдрный уголкового отражатель конструктивно состоит из четырех деталей, выполненных из тонкой



**Рис. 3.** Квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя с радиусом секторной грани 0,25 м на частоте 3 ГГц

листовой стали с пазами, прорезями и шипами шириной и высотой, равными толщине листа: двух дисков диаметром 0,5 м и двух полудисков того же диаметра. В обоих дисках имеется паз протяженностью 1/2 диаметра в одном направлении, а также в перпендикулярном направлении два диаметрально противоположных паза размером 1/2 радиуса каждый у одного диска и линейка из восьми прорезей по всему диаметру у другого диска. У каждого из двух полудисков имеются паз размером 1/2 радиуса и четыре шипа. Детали октаэдрного отражателя изготовлены по высокоточной технологии лазерным режущим инструментом на станке с числовым программным управлением. После сборки деталей в специальном кондукторе их положение фиксируется с помощью точечной сварки. Благодаря таким конструкции и технологии изготовления получены высокоточная сборка

и значение ЭПР, близкое к расчетному для значений  $2a/\lambda > 5$ , что для размеров используемого октаэдрного отражателя\* соответствует частотам 4, 8 и 10,5 ГГц.

Таблица 1

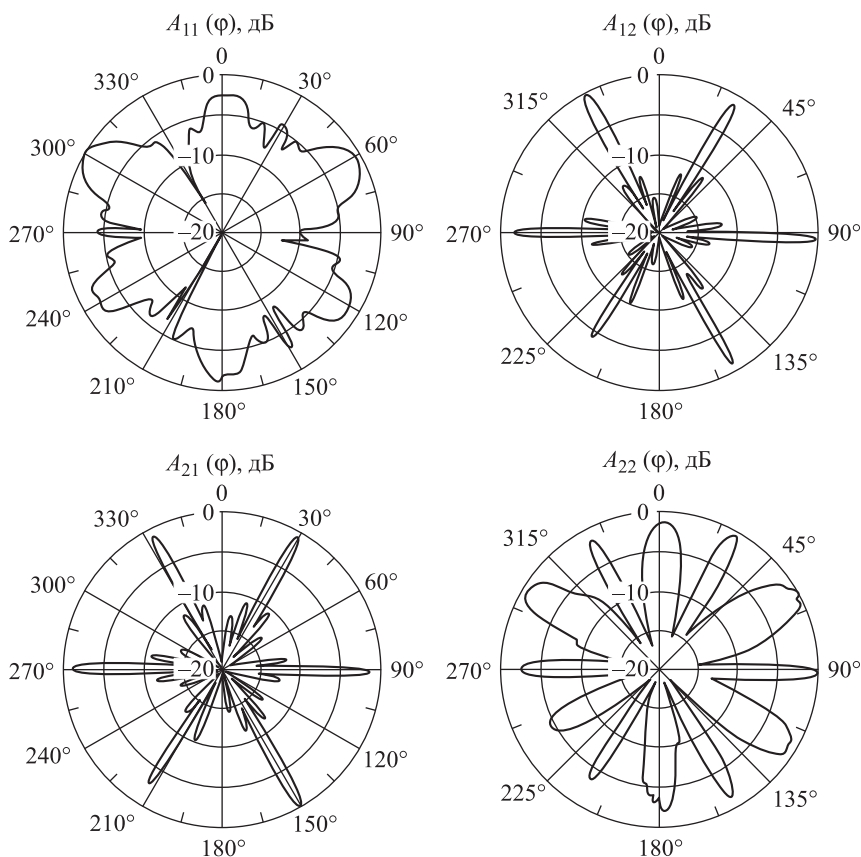
**Экспериментальные значения ширины поляризационной индикатрисы рассеяния и ЭПР октаэдрного отражателя для различных частот при согласных поляризациях излученного и принятого сигналов**

$f$ , ГГц	$\frac{2a}{\lambda}$	$\sigma_m$ , м <sup>2</sup>	$A_{11}(\varphi)$			$A_{22}(\varphi)$		
			$\overline{A_{11}^{\max}}$ , дБ	СКО $A_{11}^{\max}$ , дБ	$\Delta\varphi_i$ (5 дБ), $i = 1,3,5$ $i = 2,4,6$	$\overline{A_{22}^{\max}}$ , дБ	СКО $A_{22}^{\max}$ , дБ	$\Delta\varphi_i^0$ (5 дБ) $i = 1,3,5$ $i = 2,4,6$
2	3,3	2,7	-1,17	0,7	360°	-1,94	0,475	360°
3	5	6,1	-1,138	0,96	$\frac{45}{54}$	-1,4	0,54	$\frac{22,5}{24}$
4	6,7	10,8	-1,62	0,83	$\frac{22}{30}$	-1,91	1	$\frac{18,5}{21,2}$
8	13	43	-5,05	0	$\frac{30}{33,7}$	-5,12	0,224	$\frac{31,8}{33,7}$
10,5	17	75	-1,35	0,9	$\frac{31,8}{37,6}$	-3,09	0,086	$\frac{35,6}{37,5}$

На частоте 2 ГГц угловая модуляция отраженного сигнала не превышает  $\pm 1$  дБ от среднего значения на согласных поляризациях зондирующего и принимаемого сигналов при 60-градусной периодичности этой модуляции на 360°. На всех частотах лепестки с нечетными индексами ( $i = 1, 3, 5$ ) имеют меньшую угловую ширину по сравнению с лепестками с четными индексами ( $i = 2, 4, 6$ ). Это вполне объяснимо расположением относительно оси вращения трехгранных уголковых отражателей октаэдрной компоновки (см. рис. 1). На частоте 4 ГГц заметна минимальная угловая ширина лепестков на вертикальной и горизонтальной согласных поляризациях как для нечетных ( $i = 1, 3, 5$ ), так и для четных ( $i = 2, 4, 6$ ) групп лепестков.

В табл. 2 приведены экспериментальные значения других характеристик поляризационных индикатрис рассеяния в зависимости от параметра  $2a/\lambda$ , соответствующего частотам 2, 3, 4, 8 и 10,5 ГГц: уровней боковых лепестков (УБЛ) относительно главного лепестка (УБЛ-11, УБЛ-22) и их угловой ширины  $\Delta\varphi'_{11}$  (5 дБ),  $\Delta\varphi'_{22}$  (5 дБ) для согласных

\* Авторы выражают благодарность Д.И. Лебедюку за разработку конструкции и изготовление макета октаэдрного уголкового отражателя.



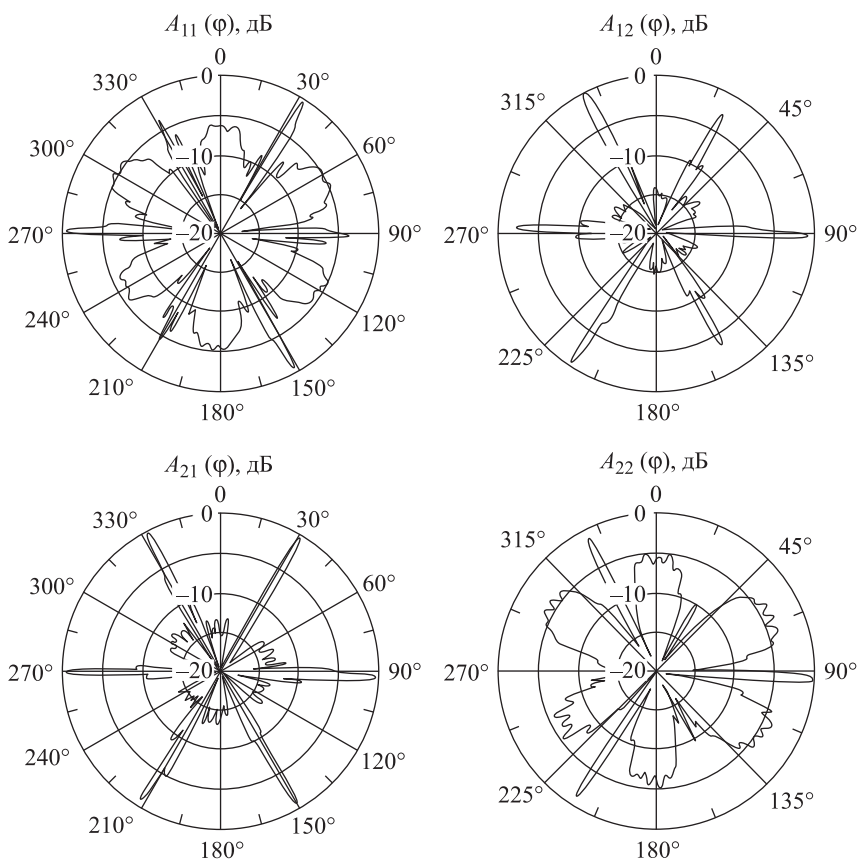
**Рис. 4.** Квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя с радиусом секторной грани 0,25 м на частоте 4 ГГц

поляризаций ( $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ), а также УБЛ относительно главного лепестка УБЛ-12, УБЛ-21 и угловая ширина главного лепестка  $\Delta\varphi'_{12}$  (5 дБ),  $\Delta\varphi'_{21}$  (5 дБ) для перекрестных поляризаций ( $A_{12}$ ,  $A_{21}$ ).

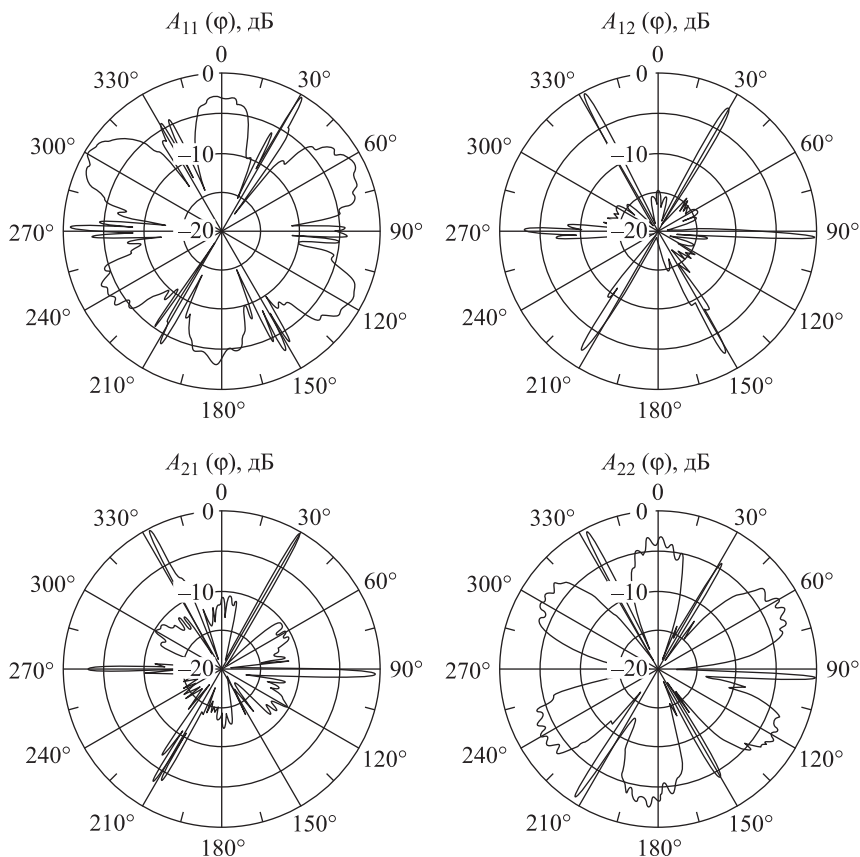
Измеряемые УБЛ относительно уровней главных лепестков индикатрисы рассеяния на согласных поляризациях соизмеримы с последними и даже превосходят их в 2...2,5 раза, а угловое положение этих боковых лепестков на индикатрисах рассеяния при согласных поляризациях зондирования и приема совпадает с угловым положением главных лепестков на индикатрисах рассеяния при перекрестных поляризациях зондирования и приема. При этом угловая ширина боковых лепестков индикатрис рассеяния на согласных поляризациях приблизительно равна угловой ширине главных лепестков индикатрис рассеяния на перекрестных поляризациях, а их частотные зависимости одинаковы.

**Экспериментальные значения уровня боковых лепестков  
октаэдрного отражателя и их угловая ширина для различных  
частот при согласной ( $A_{11}$ ,  $A_{22}$ ) и перекрестной ( $A_{12}$ ,  $A_{21}$ )  
поляризациях излученного и принятого сигналов**

$\frac{2a}{\lambda}$	$\Delta\varphi'_{11}$ и УБЛ $A_{11}$		$A_{12}$		$\Delta\varphi'_{22}$ и УБЛ $A_{22}$		$A_{21}$	
	$\Delta\varphi'$ (5 дБ), град	УБЛ-11, дБ	$\Delta\varphi'_{12}$ (5 дБ), град	УБЛ-12, дБ	$\Delta\varphi'$ (5 дБ), град	УБЛ-22, дБ	$\Delta\varphi'_{21}$ (5 дБ), град	УБЛ-21, дБ
3,3	—	—	15,5	-9	—	—	11,25	-12
5	—	—	11,25	-11	11,25	0	9,84	-11
6,7	—	—	7°	-12	8,44	0	7°	-12
13	5,625	+4	5°	—	5,625	+4	5°	-10
17	—	-3	3°	—	4,2	+3	4°	-9



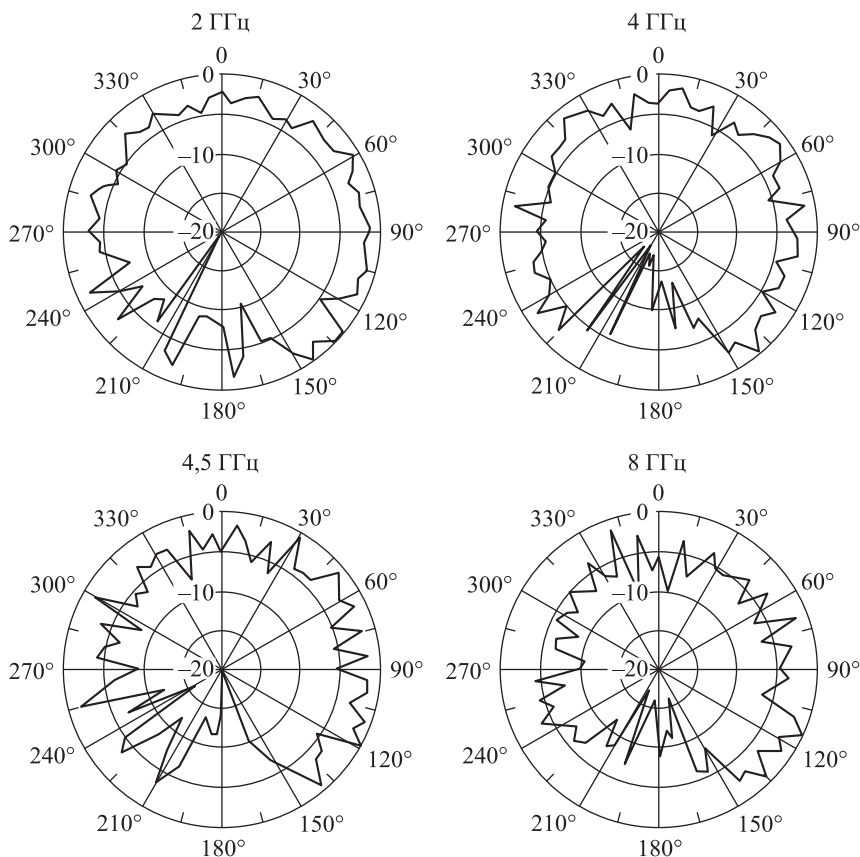
**Рис. 5.** Квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя с радиусом секторной грани 0,25 м на частоте 8 ГГц



**Рис. 6.** Квазимоностатические поляризационные индикатрисы рассеяния октаэдрного отражателя с радиусом секторной грани 0,25 м на частоте 10,5 ГГц

На рис. 7 приведены экспериментальные индикатрисы рассеяния сферического отражателя диаметром 0,7 м, имеющего наружную отбортовку в экваториальной плоскости для соединения образующих полусфер, а также эллиптический проем с размером осей 0,4×0,34 м, измеренные на частотах 2, 3, 4,5 и 8 ГГц. Расчетное значение ЭПР такого отражателя составляет 0,38 м<sup>2</sup> и не зависит от частоты при условии, что радиус сферы намного больше длины волны [2]. В исследуемом случае для приведенных выше частот это отличие не превышает 10 % для самой низкой из них. Угловой размер проема составляет приблизительно 60°. В связи с этим в границах индикатрис рассеяния между -135° и +135° имеется резкое снижение уровня сигнала. За пределами этих границ измеренные индикатрисы рассеяния сферического отражателя имеют признаки угловой равномерности и их изрезанность с СКО 2...3дБ от средней окружности объясняется малым уровнем отраженного от сферы сигнала 5,6 мВ при по-





**Рис. 7.** Индикатрисы рассеяния сферы диаметром 0,7 м на частотах 2, 3, 4,5 и 8 ГГц

роге чувствительности установки 5 мВ. Отметим, что при измерении индикатрис рассеяния октаэдра уровень сигнала составлял 25 мВ, а аналогичные измерения трехгранного уголкового отражателя с квадратными гранями размером 0,25×0,25 м происходили при уровне сигнала 33,5 мВ.

**Заключение.** Все восемь уголкового отражателей с секторными гранями, образующие октаэдрную компоновку, имеют СКО максимальных значений индикатрис рассеяния от их среднего значения, а следовательно, и ЭПР в пределах 0,9 дБ на всех частотах (2, 3, 4, 8 и 10,5 ГГц), что находится в пределах погрешностей измерений и свидетельствует о высокой точности их изготовления и возможности использования данного октаэдрного отражателя в качестве образцовой меры ЭПР. Применение в качестве образцовой меры ЭПР сферы диаметром 0,7 м с ЭПР 0,4 м<sup>2</sup> также возможно, однако следует учитывать, что отраженный от объекта с таким значением ЭПР сигнал

принимается на пороге чувствительности установки. Для повышения чувствительности необходима модернизация установки с заменой генератора пикосекундных импульсов на напряжение не менее 30 В, а также применение малошумящих усилителей в стробоскопическом преобразователе. Для имитации дальней зоны в радиолокационных и антенных измерениях предполагается сооружение коллиматора размером 2,5×2,5 м.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жирнов В.Г., Лебедюк И.И. Экспериментальные исследования зеркальной антенны с облучателем обратного излучения трехсантиметрового диапазона во временной области с преобразованием в частотную область. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/950.html>.
- [2] Кобак В.О. *Радиолокационные отражатели*. Москва, Сов. Радио, 1975, 247 с.

Статья поступила в редакцию 26.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Жирнов В.Г., Лебедюк И.И., Макаров В.А. Экспериментальные исследования во временной области отражательных характеристик октаэдрной компоновки трехгранных уголкового отражателей с секторными гранями. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/952.html>

**Жирнов Владимир Георгиевич** родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Радиоинженер, сотрудник Дмитровского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 8 научных публикаций в области радиоэлектроники СВЧ. e-mail: [zhirnovv@mail.ru](mailto:zhirnovv@mail.ru)

**Лебедюк Игорь Иосифович** родился в 1943 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1966 г. Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 72 научных публикаций и изобретений в области антенн и техники СВЧ.

**Макаров Вячеслав Александрович** родился в 1942 г., окончил в 1973 г. Военную инженерную радиотехническую академию ПВО имени Маршала Советского Союза Говорова Л.А., инженер 1-й категории НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана, работает в области антенных измерений, имеет публикации.