

## **ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛЬНЫХ ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ В УСЛОВИЯХ СЛАБОЙ БЕЗЭХОВОСТИ**

*В. С. Бачурин, Е. В. Безукладников, В. Д. Пышный, А. Д. Деменёв*

*Концерн ПВО “АЛМАЗ-АНТЕЙ” Опытное конструкторское бюро “Новатор”*

*Рассмотрен метод измерения характеристик электромагнитного рассеяния на основе частотно-временных преобразований. Методика обеспечивает измерение эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объекта и его локальных центров рассеяния в условиях обычных производственных помещений без радиопоглощающих покрытий. За один поворот платформы стенда выполняется измерение координат локальных центров рассеяния (ЛЦР), их частотные и угловые характеристики. Приведенные результаты подтверждают эффективность метода.*

### **Введение**

При предъявлении к разрабатываемому объекту требований малой радиолокационной заметности (МРЛЗ) уже на первоначальных этапах проектирования принимаются меры, обеспечивающие снижение его эффективной площади рассеяния (ЭПР) и устраняющие источники зеркальных отражений для заданных секторов облучения. Объем принятых мер зависит как от предъявленных требований, так и от опыта разработчика. Достигнутый результат проверяется измерениями. В большинстве случаев оказывается необходимым этап экспериментальной отработки. Основная его задача выявить на объекте и найти пути устранения оставшихся локальных центров рассеяния (ЛЦР). Затраты времени и средств на экспериментальную отработку МРЛЗ существенно зависят от информативности метода измерения и требований к условиям измерений.

В идеальном случае метод должен обеспечивать:

- возможность измерений при минимальных требованиях к внешним условиям, в частности в производственных помещениях без покрытия стен радиопоглощающим материалом (РПМ);
- одновременно измерять индивидуальные характеристики рассеяния различных элементов объекта;
- определять координаты, амплитудные и частотные характеристики ЛЦР;
- априорно оценивать достижимый уровень снижения ЭПР объекта при устранении выбранного набора ЛЦР, контролировать результативность принимаемых мер;
- выполнять экспериментальную отработку ЭПР элементов непосредственно на объекте или его части без создания измерительных моделей с минимальным уровнем ЭПР;
- за один цикл измерений (поворот стенда) измерять угловые и частотные характеристики рассеяния объекта, его элементов и ЛЦР.

Эти требования обеспечивает метод измерений с применением частотно-временных преобразований. Метод не имел широкого распространения из-за высоких требований к измерительной аппаратуре, но в настоящее время он может быть реализован на основе серийной измерительной аппаратуры.

## Метод измерений

Алгоритм измерений с использованием измерителя  $S$  параметров типа PNA-L приведен на рис.1. Измерительные каналы 1 и 2 идентичны. При измерениях используется один или два канала одновременно. Измерение  $S_{11}$  ( $S_{22}$ ) соответствует обратному рассеянию (однопозиционной локации). При пространственном разnose антенн измерение  $S_{12}$  ( $S_{21}$ ) соответствует двухпозиционному рассеянию. При применении в каналах антенн с ортогональной поляризацией измеряется комплексная матрица рассеяния. В дальнейшем для упрощения записи индексы номеров каналов не указываются.

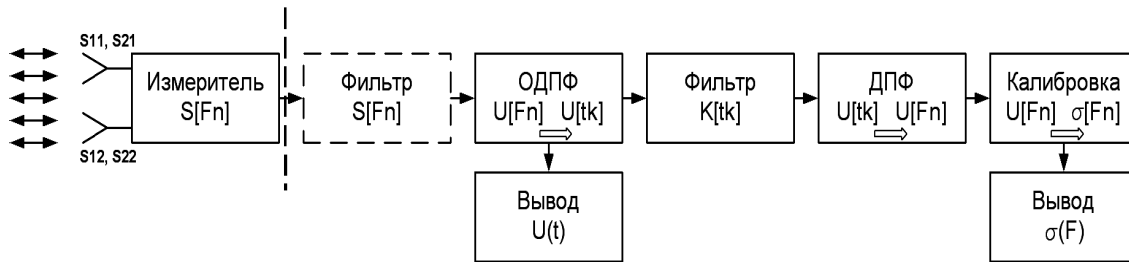


Рис. 1. Алгоритм измерений ЭПР методом частотно-временных преобразований.

Исследуемый объект последовательно облучается набором из  $N$  квазимонохромных частот  $F_n$  в диапазоне от  $F$  до  $F+\Delta F$  с шагом перестройки  $dF$ . Диапазон сканирования частоты  $\Delta F=dF(N-1)$  определяет шаг отсчетов по дальности  $\Delta D=c/2\Delta F$  ( $c$  – скорость света). После перевода данных измерений во временную область формируется временной спектр с периодом повторения по дальности  $D'=c/2dF$ . Выбор  $N$  задает относительную разрешающую способность  $D'/\Delta D=\Delta F/dF=N-1$ . Для исключения наложения спектров необходимо выполнять условие  $D < D'$ .

Один цикл сканирования сформирует последовательность из  $N$  комплексных значений  $S_n$ , соответствующих частотам  $F_n$ . Измеренные данные заносятся в память. Значения  $S_n$  это алгебраическая сумма входного сигнала  $S_n^a$  вызванного отражениями в антенно-фидерном тракте с полезным сигналом, отраженным от исследуемого объекта  $S_n^s$  и помехами вызванными отражениями от местных предметов  $S_n^p$ . Две последние составляющие зависят от коэффициента передачи антенно-фидерного тракта  $k_n$ . В результате  $S_n=S_n^a+k_n(S_n^s+S_n^p)$  и задача измерения сводится к выделению  $S_n^s$  и калибровке результатов по эталонному отражателю.

Связь всех параметров сведена в таблицу.

Параметр	Шаг	Период
Частота F	dF	$\Delta F=(N-1) \cdot dF$
Время T	dT=1/dF	$\Delta T=1/dF$
Дальность D	dD=c·ΔF/2	$\Delta D=c \cdot \Delta T / 2$

временным интервалом  $dT=1/\Delta F$ .

Форма отклика от объекта или ЛЦР во временной области соответствует свертке функций в частотной области.

Обратное комплексное дискретное преобразование Фурье переводит  $S_n$  во временную область. Отсчеты во временной области  $U_k, k=0..(N-1)$  соответствуют диапазону дальности от 0 до  $D'$  и разделены

При измерениях используется частотное окно прямоугольной формы. Преобразование Фурье приводит к появлению во временной области боковых лепестков с уровнем -13 дБ. Фильтрация измеренных данных (частотное окно) может снизить уровень лепестков до -60 дБ при ухудшении разрешающей способности по дальности в 2-3 раза.

Для стробирования сигнала во временной области приравниваем нулю все отсчеты, не совпадающие по времени прихода с сигналом, отраженным от объекта (или исследуемого ЛЦР). После преобразования Фурье формируется последовательность отсчетов  $S_n^s$  соответствующая частотной характеристике рассеяния объекта (или выбранного ЛЦР), измеренной в условиях идеальной безэховости. Стробирование одновременно снижает уровень шума приемного устройства и шума вызванного первым преобразованием Фурье. Для получения корректных результатов необходимо оптимизировать ширину строба. Широкий строб увеличивает уровень внешних помех. Узкий строб обрезает часть сигнала, что увеличивает погрешность измерений.

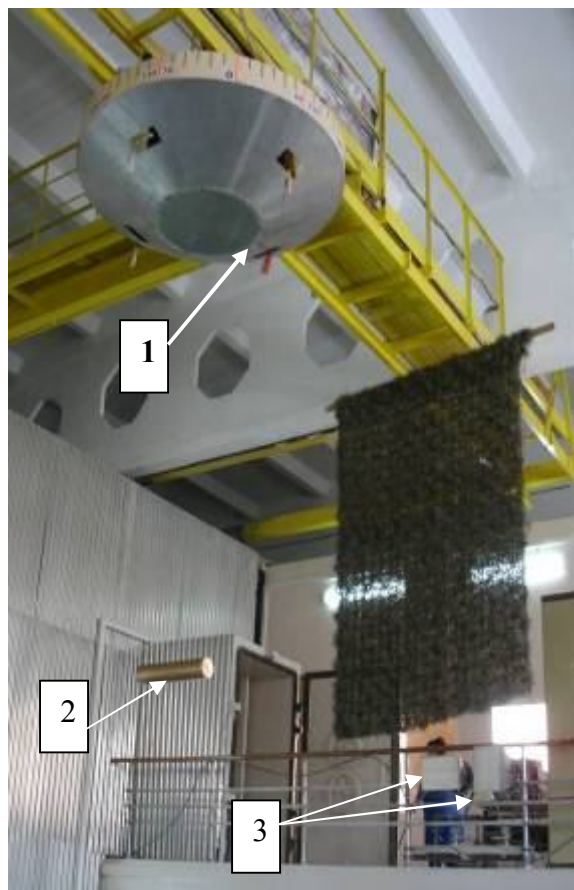
Полная мощность временного отклика равна  $P_r$ , а строб выделяет часть отклика с мощностью  $P'_r = P_r - \Delta P_r$ . Мощность  $\Delta P_r$  можно отождествить с внешней помехой. В частотной области это приводит к амплитудной модуляции последовательности отсчетов. Глубина модуляции определяется соотношением  $P'_r$  и  $\Delta P_r$ , а период пространственному разнесу фазовых центров откликов соответствующих  $P'_r$  и  $\Delta P_r$ . Глубина модуляции может служить оценкой точности результата измерений при выбранных параметрах строба.

В общем случае  $\Delta P_r$  состоит из суммы помех, образованных отсечением частей сигнала расположенных перед и после строба, и помехи соответствующей запаздывающим частям отклика от ЛЦР, имеющих меньшую дальность. Каждое слагаемое формирует свой период модуляции. Дополнительная фильтрация в частотной области [1] подавляет модуляционные частоты и уменьшает погрешность измерений. Форма фронтов строба не оказывает существенного влияния, если они расположены на временных участках с уровнем сигнала близким к нулю.

Преобразованию Фурье для временной последовательности из  $N$  отсчетов, формирует отсчеты для сетки частот, на которых выполнено измерение. Изменение длины последовательности добавлением нулевых отсчетов позволяет получить данные для другой сетки частот, в том числе для более мелкого шага сканирования [1]. При стробировании выбирается последовательность отсчетов стремящихся к нулю на границах строба. Это условие обеспечивает ограниченность спектра после выполнения преобразования Фурье и возможность вычисления амплитуды для произвольной частоты, лежащей в диапазоне частот сканирования.

Угловая зависимость формируется повторением измерений для углов облучения  $\varphi_m$ ,  $m = 0 \dots M-1$ . Результаты измерений сохраняют в виде массива размерностью  $N \times M$  комплексных амплитуд  $S_{n,m}$ , соответствующих частотам  $F_n$ , и углам облучения  $\varphi_m$ . Для пересчета результата измерения в ЭПР выполняется измерение  $S_n^o$  эталонного отражателя с известной зависимостью ЭПР от частоты в виде  $\sigma^3(F_n)$ . При измерениях объекта и эталонного отражателя выбирают одинаковую сетку частот и дальность. Калибровка в виде  $\sigma(F_n, \varphi_m) = \sigma^3(F_n, \varphi_m) \cdot (|S_{n,m}| / |S_n^o|)^2$  формирует двумерную функцию зависимости ЭПР от частоты и угла облучения.

Возможность выполнения измерений в условиях производственных помещений без мер по снижению уровня безэховости подтверждена экспериментально. Измерения выполнялись на измерительном стенде 50Ст-126. Стенд предназначен для исследования сравнительно небольших элементов объекта и обеспечивает разрешающую способность по дальности до 10 м. При измерении на дальности 4,5 м погрешность измерения характеристик ЛЦР с ЭПР  $\sigma=2,5 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  не превышает 1 дБ.



**Рис. 2.** Контроль глубины зоны измерений:

- 1 – поворотный стенд;
- 2 – контрольный цилиндр;
- 3 – антенны.

Исследуемый объект подвешивается к поворотной платформе стенда [2]. Измерительная антенна и объект находятся на высоте 4,6 м. Одна из стен помещения имеет декоративное металлическое покрытие, дальность до неё около 3,5 м. Дальность до исследуемого объекта может устанавливаться от 4,5 м до 10 м. Общее представление об условиях в которых выполнялись измерения даёт рис.2. Практически в любом производственном помещении достаточных размеров могут быть созданы более благоприятные условия.

При организации рабочего места предварительно проверяют уровень фона во временной области, вызванный отражениями от местных предметов. Результат измерения приведен на рис.3.

Повышение уровня фона на дальности 16 м вызвано отражением от задней стенки. Многократные переотражения могут вызывать задержанные отклики. Для их контроля шкала дальности на рисунке значительно превышает размеры помещения. На дальности 4,69 м виден отклик от эталонной сферы диаметром 100 мм ( $\sigma=7,8 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ ). Его амплитуда превышает уровень фона (дифференциальную ЭПР) на 35 дБ, следовательно, измерение  $\sigma = 2,5 \times 10^{-4} \text{ м}^2$  (отношение сигнал/шум = 20 дБ) можно выполнить с погрешностью, не превышающей  $\pm 1$  дБ.

На рис.2 виден контрольный цилиндр. Измерение во временной области откликов от цилиндра позволяет определить допустимый размер части объекта, которая может находиться перед исследуемым ЛЦР. Цилиндр с горизонтальной продольной осью формирует отраженный луч широкий в вертикальной плоскости и узкий в горизонтальной. При повороте цилиндра вокруг вертикальной оси на угол  $\pm 45^\circ$ , луч отклоняется на угол  $\pm 90^\circ$ . Если в луч попадает источник переотражений, возникает задержанный по времени отклик. Проверка показала, что ближайший отклик имеет задержку по дальности

около 2 м, его амплитуда на 45 дБ меньше уровня зеркального отражения от цилиндра, и он вызван отражением от конической части защитного кожуха поворотного стенда.

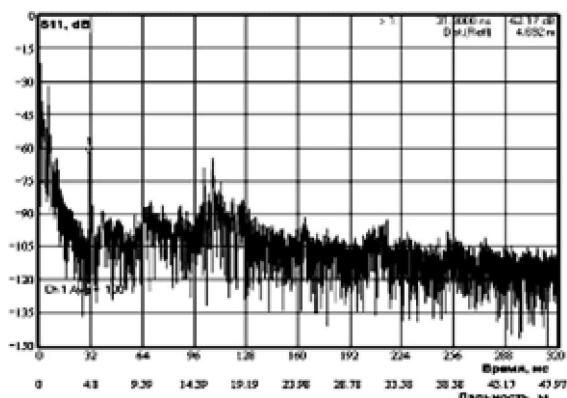


Рис. 3. Фон зала во временной области.

позволяет осуществлять быструю проверку настройки фокусировки коллиматора. На рис.4 приведена синограмма [3] прямоугольной металлической пластинки размером 200x200мм, прогиб 1,5 мм, измерена в диапазоне перестройки частоты от 1ГГц до 12 ГГц, поляризация вертикальная (параллельна кромке). Амплитуда отражения от вогнутой стороны (средний всплеск) примерно на 10% больше. Это позволяет оценить погрешность измерений, вызванную невыполнением условий дальней зоны.

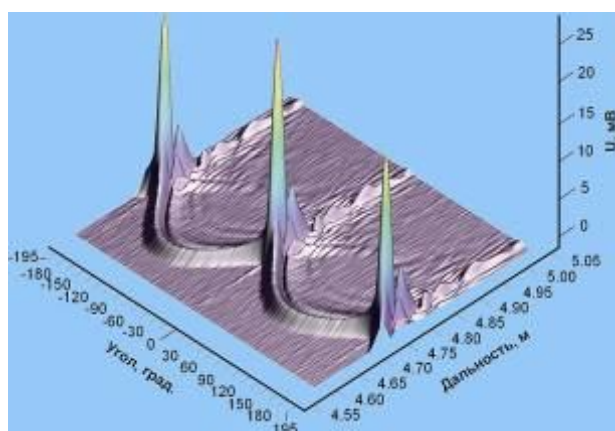


Рис.4 Синограмма пластинки 200x200мм  
Прогиб 1,5мм.

представляет распределение ЛЦР по дальности для произвольного угла облучения. Радиолокационное изображение (портрет) объекта может быть сформировано по его синограмме [3, 4].

След мигрирующего ЛЦР (координаты зависят от угла облучения) может отличаться от синусоидального. Примером мигрирующего ЛЦР может служить зеркальное отражение от выпуклой поверхности. Выявление мигрирующего ЛЦР по его следу обычно не вызывает затруднений. Несколько сложнее выявлять структурные ЛЦР, когда два или несколько элементов объекта образуют структуру подобную уголкового отражателю.

Максимальный размер исследуемого ЛЦР ограничивается размерами дальней зоны. Контроль выполнения условий дальней зоны проверяется измерением уровней зеркального отражения пластины имеющей небольшой прогиб. При выполнении условий дальней зоны соблюдается равенство амплитуд зеркального отражения выпуклой и вогнутой сторон. При выпуклом фронте падающей волны уровень отражения от вогнутой стороны превышает уровень отражения от выпуклой стороны. При вогнутом фронте - обратная зависимость. Это

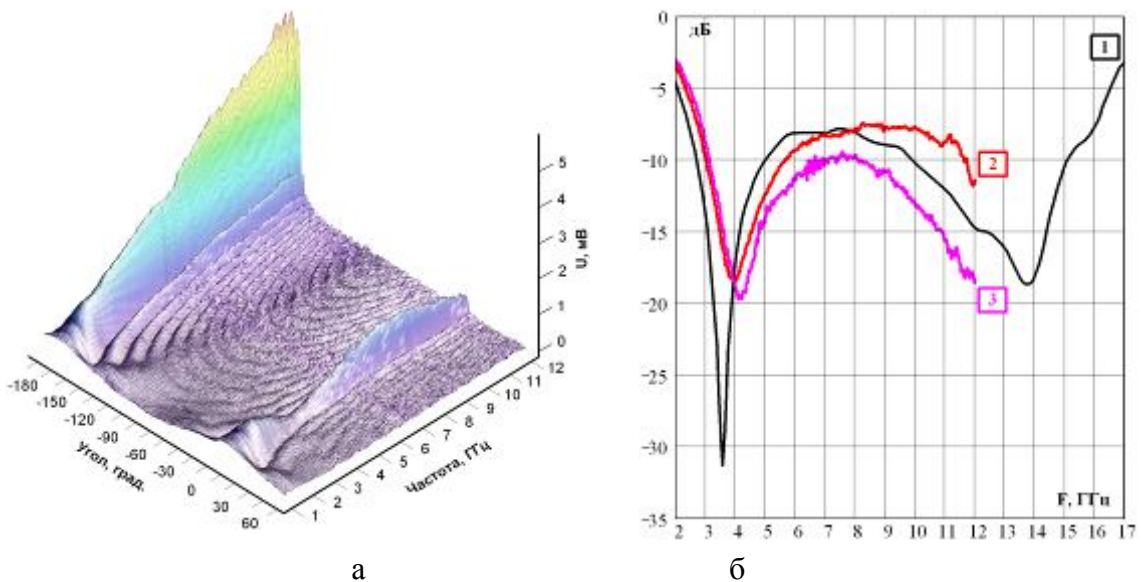
На синограмме (трехмерном графике в декартовой системе координат, оси которого соответствуют дальности, углу облучения и амплитуде) стационарные (положение не зависит от угла облучения) ЛЦР образуют синусоидальный след, амплитуда которого равна расстоянию ЛЦР до оси вращения, а фаза начальному угловому расположению. Синограммы более информативны, чем радиолокационный портрет объекта, последний отражает усредненный уровень ЛЦР при облучении в некотором секторе углов, синограмма

Дальность до отклика от такого ЛЦР соответствует половине общего пути распространения волны, в результате отклик от его может оказаться вне контура объекта.

### Пример измерения характеристик ЛЦР

Возможности измерений данным методом характеристик ЛЦР покажем на примере измерения рассеяния от несогласованной границы двухслойного РПМ с магнитными потерями нанесенного на часть металлического листа.

Для оценки характеристик РПМ предварительно проведено измерение синопаммы пластины 200x200x4 мм, покрытой этим РПМ. Преобразование Фурье синопаммы формирует спектральную характеристику рассеяния (СХР) - зависимость амплитуды обратного рассеяния от угла облучения и частоты сигнала. Из СХР приведённой на рис. 5а видно, что в секторе углов ( $\pm 90^\circ$ ), который соответствует облучению стороны покрытой

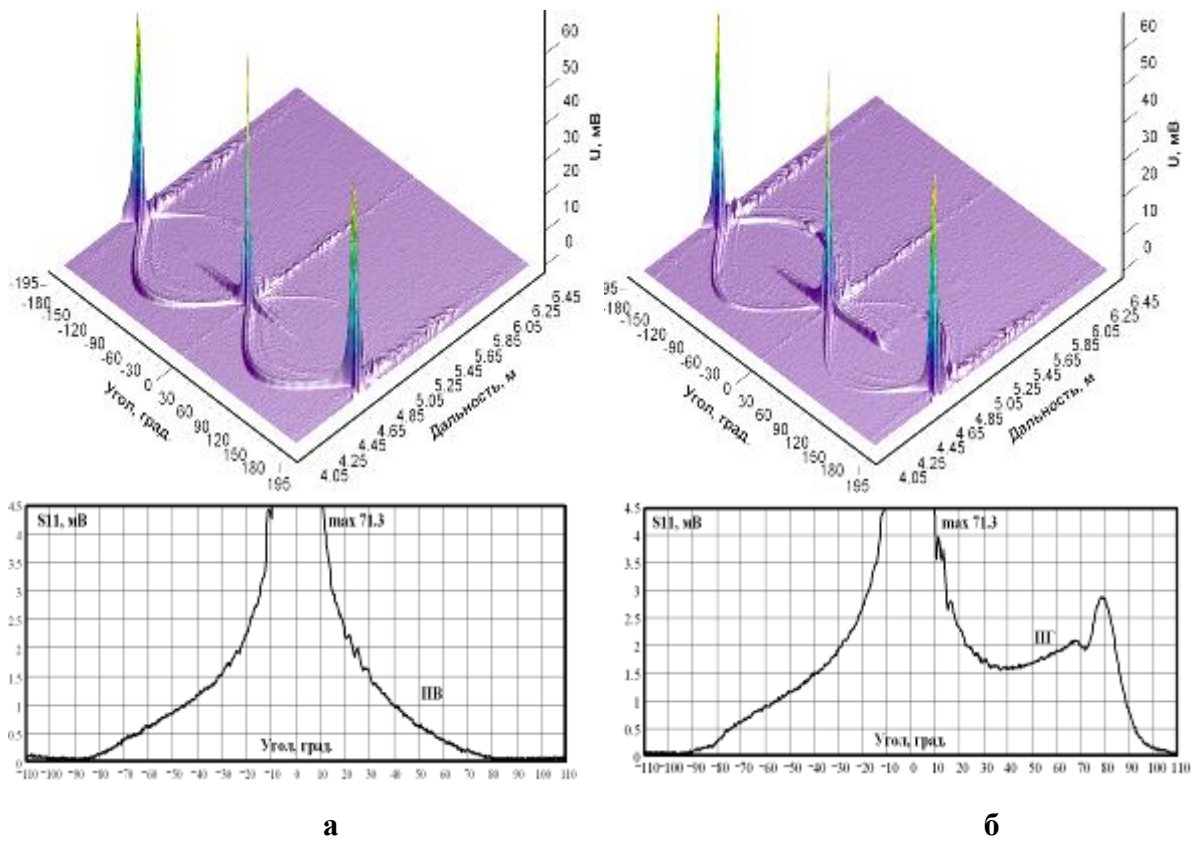


**Рис. 5** СХР пластины покрытой РПМ (а); коэффициент зеркального отражения РПМ (— 1б), снижение отражений от грани: пластина 200x200мм (--- 2б), пластина 500x500 мм (--- 3б).

РПМ, снизился уровень зеркального отражения и боковых лепестков. Влияние покрытия проявляется и для стороны без покрытия. Амплитуда боковых лепестков уменьшилась в низкочастотной части диапазона измерений при углах облучения близких к скользящему.

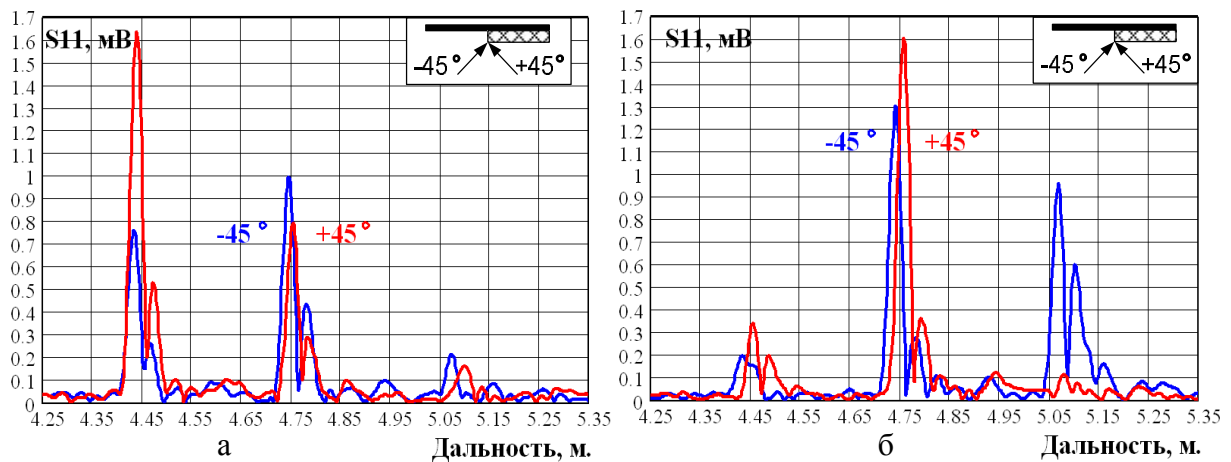
Коэффициент снижения уровня зеркального отражения измеренный, как отношение амплитуд зеркальных максимумов отражений от сторон пластинки показан на рис. 5б сплошной линией. Коэффициент зеркального отражения РПМ измеренный стандартным методом в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН приведен на рис. 2б (пунктир). Различие результатов вызвано дифракцией от краёв пластинки. Сдвиг на графиках частоты максимального поглощения вызван различием характеристик образцов РПМ, а не особенностями цифровой обработки. Это подтверждено непосредственным измерением  $S_{11}$  согласованной рупорной антенны закрытой пластиной с исследуемым образцом РПМ.

Для измерения рассеяния границы РПМ-металл образец РПМ размером 500x500x6 мм



**Рис. 6.** Синограммы пластины, частично покрытой РПМ и их сечения по границе покрытия, а – поляризация вертикальная, б – поляризация горизонтальная

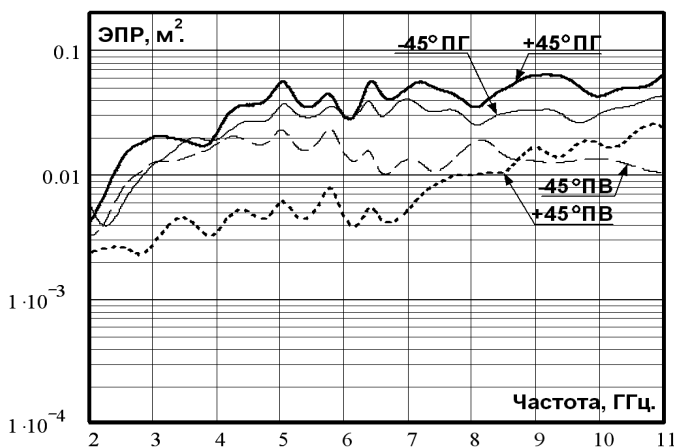
нанесен на металлический лист размером 1000x500x1,5 мм. На рис.6 приведены синограммы этой модели. Граница раздела совпадает с осью вращения и на синограммах её след образует прямую линию при нахождении границы на освещенной стороне пластины (сектор  $\pm 90^\circ$ ). Под синограммами приведены графики зависимости амплитуды отклика от границы раздела от угла облучения. Максимум при угле облучения равен 0, соответствует зеркальному отражению от грани пластины, на которую нанесен РПМ. Его уровень равен 71,3 мВ.



**Рис. 7** Сечения синограмм для углов облучения  $-45^\circ$  и  $+45^\circ$ , а – поляризация вертикальная, б – поляризация горизонтальная.

Для сравнения амплитуд отраженного сигнала от раздела РПМ – металл и краев пластины на рис.7 приведены сечения синопграмм для углов облучения  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$  для вертикальной поляризации (рис. 8а) и горизонтальной поляризации (рис. 8б). Левый отклик соответствует отражению от передней кромки, средний – от границы раздела РПМ – металл, правый - от задней кромки.

Амплитуда отклика от несогласованной границы перехода РПМ – металл может превышать амплитуду откликов от краев пластины. Подавление одного ЛЦР может вызывать появление новых более мощных ЛЦР (сечения  $\pm 45^\circ$  не соответствуют максимальному отклику от границы раздела). Рассматриваемый метод измерений позволяет выявить это, в результате снижаются затраты на экспериментальную отработку МРЛЗ объекта.



**Рис. 8.** Зависимость ЭПР границы раздела РПМ – металл от частоты

Выделим отклик от границы раздела. После перехода в частотную область, формируется частотная характеристика границы раздела. На рис.8 видно, что она монотонна и не содержит минимумов, соответствующих зеркальному коэффициенту отражения РПМ. Нормировка результата выполнена по эталонной сфере диаметром 100 мм.

При селекции отклика от границы раздела ширина строка преднамеренно установлена меньше оптимальной. Около 2% мощности сигнала отраженного от границы раздела РПМ – металл находится за его пределами, это вызвало амплитудную модуляцию последовательности отсчетов в частотной области. Это наглядно показывает, что для получения достоверных результатов измерений необходима определенная осторожность при выборе ширины временного строка перед выполнением перехода в частотную область.

В заключении отметим, непосредственный процесс измерения с шагом по углу  $0,1^\circ$  и по частоте 6,875 МГц занял около 6 минут. При этом фактически были выполнены два цикла измерений. Для обеспечения идентичности характеристик высокочастотного тракта измерения были выполнены для вертикальной поляризации сигнала и повторены для горизонтальной поляризации сигнала по одному измерительному каналу.

## Литература

1. Стивен Смит, Цифровая обработка сигналов, Москва, Додэка-XXI, 2008 г.
2. Бачурин В. С., Батухтин Д. М. Стенд 50Ст-126 для отработки радиолокационной заметности элементов изделия Научно-технический сборник, Проектирование и производство летательных аппаратов. Екатеринбург 2006 г, с. 117-120.
3. Фархат Н. Х. Формирование радиолокационного изображения методом разнесения в диапазоне СВЧ и автоматизированная идентификация целей, основанная на использовании моделей нейронных сетей. ТИИЭР т. 77, 1989 г, с 43-56.