

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЭПР МЕТОДОМ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

В. С. Бачурин, А. Д. Деменёв, В. Д. Пышный

АО “Концерн ПВО “Алмаз-Антей” ОАО “ОКБ Новатор

Получена 28 июня 2010 г.

**Аннотация.** Рассмотрен метод измерения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) объекта методом частотно-временных преобразований. Измерения могут выполняться в условиях обычных производственных помещений, не имеющих радиопоглощающих покрытий. После обработки результатов измерений формируются данные об угловых и спектральных характеристиках рассеяния объекта, координаты и характеристики его локальных центров рассеяния. Приведенные примеры измерения характеристик рассеяния для простых тел подтверждают низкие требования к уровню безэховости и высокую информативность метода.

**Ключевые слова:** эффективная поверхность рассеяния, угловые и спектральные характеристики рассеяния.

Характеристику рассеяния электромагнитного поля объектом принято выражать через его эффективную поверхность рассеяния (ЭПР), которая численно характеризует поле, рассеянное объектом при его облучении плоской однородной монохромной волной. При расположении тела в свободном пространстве его ЭПР ( $\sigma$ ) можно записать в виде:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2},$$

где  $E_i$  - напряжённость поля плоской падающей волны в районе объекта;  $E_s$  - напряжённость поля в точке приёма, вызванная отраженной от объекта волной;  $R$  - расстояние между объектом и точкой, в которой производится измерение

отраженного поля.

Поляризация падающего и отраженного поля в общем случае различны и значение  $\sigma$  можно представить в виде матрицы, элементы которой определяют рассеяние для двух ортогональных поляризаций и кроссполяризации. В свою очередь элементы матрицы это функции от частоты сигнала, угла облучения, угла наблюдения.

При измерениях напряженность поля в точке приема равна  $E_{\Sigma}$  - векторной сумме напряженности поля сигнала  $E_s$  и помехи  $E_p$ , вызванной связью между приёмным и передающим каналами и отражениями от местных предметов. Напряженность поля  $E_p$  может на несколько порядков превышать  $E_s$ . Априорно полагаем, что вне зависимости от используемого метода измерений он позволяет выделить из  $E_{\Sigma}$  сигнал соответствующий  $E_s$ .

Для обеспечения аддитивности при обработке результатов измерений характеристику рассеяния представим в виде нормированной амплитуды напряженности рассеянного поля в виде:

$$A = \sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2R\sqrt{\pi} \frac{E_s}{E_i}$$

Название «нормированная амплитуда» возможно применено не совсем удачно, её размерность – метры. С другой стороны, мощность отраженного сигнала на входе приёмника пропорциональна  $\sigma$ , соответственно при  $R = const$  амплитуда входного напряжения  $U$  пропорциональна  $A$ . Коэффициент пропорциональности зависит от антенной системы и частоты сигнала  $f$ .

При измерении ЭПР объекту придаётся вращение вокруг оси, перпендикулярной направлению распространения падающей волны. За один полный оборот объекта, или цикл измерения, выполняется измерение ЭПР в секторе углов  $0..2\pi$ . Поляризации падающего поля определена передающей антенной. Количество независимых приёмных каналов определяет возможное

число одновременно измеряемых индикатрис [1] рассеяния. Размещение и поляризации приёмных антенн зависит от цели измерения. В дальнейшем считаем, что при измерениях используется только один приемный канал, приёмная и передающая антенны совмещены (однопозиционная локация, обратное рассеяние). При измерениях на одной частоте в секторе углов  $0-2\pi$  и результат сохраняется в памяти в виде последовательности из  $M$  отсчетов для углов облучения  $\varphi_m$  с шагом  $d\varphi=2\pi/M$ .

Современные векторные измерители  $S$  параметров многополюсников выполняют быструю (единицы микросекунд) дискретную перестройку частоты. Это позволяет при измерении ЭПР для каждого угла  $\varphi_m$  последовательно облучить исследуемый объект набором из  $N+1$  квазимонохромных частот  $F_n$  и за один поворот платформы стенда измерить для них матрицу рассеяния размерностью  $M \times (N+1)$ . Двумерную функцию, задаваемую этой матрицей, будем называть спектром рассеяния, а её трехмерный график – спектрограммой. Сечения спектрограммы при  $\varphi=const$  это частотная характеристика рассеяния, а при  $F=const$  - индикатриса рассеяния.

На рис.1а приведена рассчитанная в соответствии с [1], а на рис. 1б измеренная в диапазоне 1-12ГГц спектрограмма для металлической пластины размером 200x200мм. Для представления в одинаковом масштабе, выполнена нормировка расчетной спектрограммы на частоте 12 ГГц.

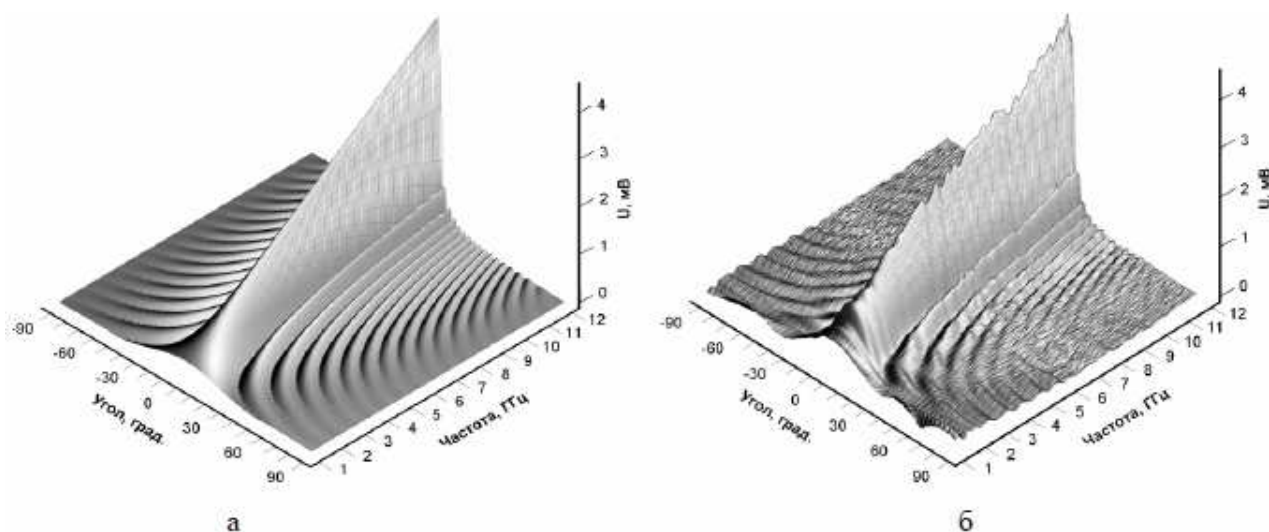


Рис.1. Рассчитанная (а) и измеренная (б) спектрограммы пластины 200x200мм.

Рассеянное объектом поле можно рассматривать как векторную сумму напряженности полей его локальных центров рассеяния (ЛЦР). Преобразование Фурье по оси частот преобразуют её в синопамму. Синопамма (sine-diagrams) это трехмерный график в декартовой системе координат зависимости амплитуды сигнала, отражённого объектом, от относительной дальности и угла облучения [2]. Название определено тем, что стационарный ЛЦР (положение которого на объекте не зависит от угла облучения) формирует на синопамме синусоидальный след. Амплитуда следа равна расстоянию между ЛЦР и осью вращения, а фаза начальному углу, вершина которого совпадает с осью вращения, стороны угла образованы направлениями на источник облучения и ЛЦР.

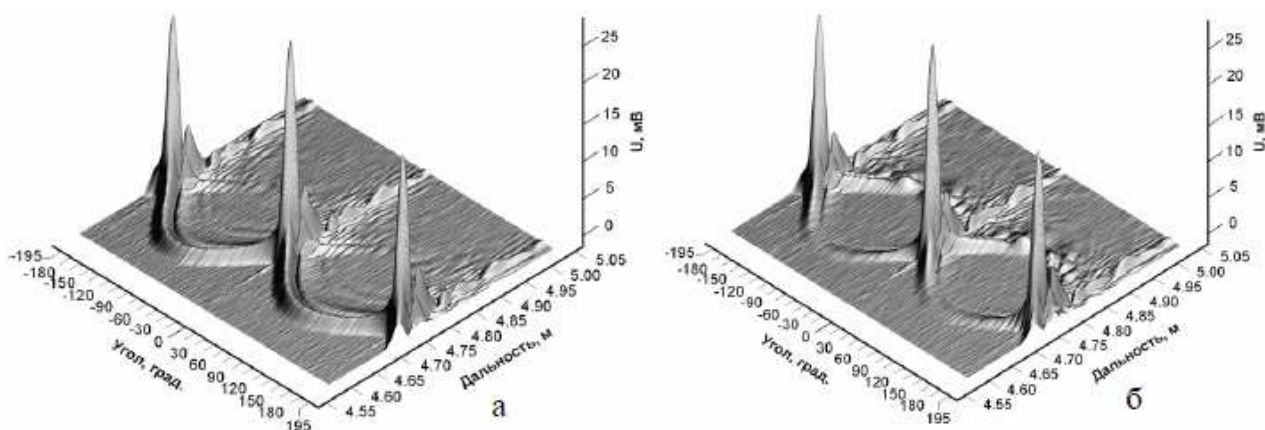


Рис. 2. Синограммы металлической пластинки 200x200x4 мм: а – поляризация вертикальная; б – поляризация горизонтальная.

На рис.2 приведены измеренные синограммы пластины 200x200мм. На синограммах видны следы, соответствующие рассеянию от передней и задней кромок. При вертикальной поляризации ( $E$  параллелен кромке) амплитуда отклика от передней кромки больше. Спектрограмма и синограмма содержат одинаковую информацию о характеристиках рассеяния объекта, представленную в частотной и временной областях и связанных преобразованием Фурье.

След на синограмме от ЛЦР позволяет определить его координаты на объекте, при этом необходимо учитывать особенности следа различных типов ЛЦР. Основные из них:

**Мигрирующий** – след, образованный точкой зеркального отражения для выпуклого тела, которая перемещается при изменении угла облучения. Если поперечное сечение тела – круг радиусом  $a$ , след остаётся синусоидальным, но смещается в сторону уменьшения дальности на  $a$ .

**Проблесковый** – наблюдается в узком секторе углов облучения. Зависимость от угла близка к Гауссовой. Формируется зеркальным отражением от плоского участка поверхности.

**Резонансный** – формируется узкополосными системами (антенны, обтекатели). За ЛЦР наблюдается протяженный по времени след, соответствующий излучению наведённых токов после ударного возбуждения. При

широкой полосе облучения след может быть малозаметен. При выборе недостаточной длины временного строба след может быть обрезан, что приводит к погрешности при переходе в частотную область.

**Структурный** – формируется элементами объекта, вызывающими многократные переотражения сигнала (углоковый отражатель, туннельный воздухозаборник самолета). Дальность зависит от фактической длины распространения волны. Всплеск от ЛЦР может наблюдаться на дальностях за пределами фактического размера объекта.

**Мираж (фантом)** – отражение от элемента в другом элементе. Примером может служить отражение облучателя в зеркале параболической антенны, которое формирует ЛЦР за параболоидом антенны на дальности, равной фокусному расстоянию.

Другие типы ЛЦР встречаются достаточно редко. Понятие «след» будет применяться и к описанию зависимости амплитуды отраженного сигнала от дальности.

Сечение синограммы для произвольного угла  $\varphi$  это одномерная функция - временная зависимость амплитуды отраженного от объекта сигнала. Преобразование Фурье формирует частотную зависимость рассеяния объекта для этого угла облучения.

Разрешающая способность по дальности – одна из основных характеристик синограммы. Под этим могут подразумеваться два понятия – расстояние между двумя ЛЦР, при котором различимы их отклики, и расстояние, при котором отклики могут рассматриваться как независимые. Широкополосный сигнал соответствует во временной области импульсу имеющему, по крайней мере, один короткий фронт. Для простоты будем считать, что это просто короткий импульс, который вызывает ударное возбуждение ЛЦР. Токи, возбужденные в ЛЦР, продолжают существовать еще некоторое время после окончания импульса, скорость затухания возбужденных токов зависит от потерь на излучение,

тепловых потерь, и наличию связанной с ЛЦР линии передачи энергии.

Скорость затухания тока разная для различных спектральных составляющих сигнала и определяет спектр рассеяния ЛЦР. Во временной области излучение наведенных токов формирует след, протяженность которого может существенно превышать физические размеры ЛЦР. Длину следа можно интерпретировать как электрическую длину ЛЦР, которая не совпадает с его физической длиной. Если след ЛЦР может быть выделен во временной области, его преобразование Фурье соответствует спектральной характеристике рассеяния ЛЦР в частотной области.

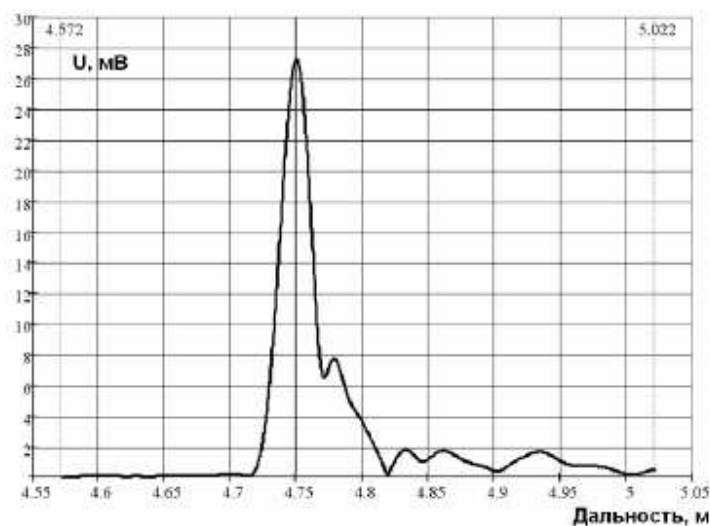


Рис. 3. Зеркальный отклик от пластины 200x200x4мм

На рис. 3 приведён след, для сечения  $\varphi=0$  на синопамме рис. 2, или зеркального отражения от пластинки. При вычислении спектрограммы (рис. 1б) использовано временное окно (строб), захватывающий диапазон дальности от 4,57м до 5,02м.

Как видно из рис. 3, след продолжается и на дальности, превышающей 5,02м. Его обнуление можно рассматривать как появление на этой дальности второго ЛЦР, создающего противофазный сигнал с амплитудой, равной реальному ЛЦР. При возврате в частотную область возникает интерференция сигналов, вызванная появлением дополнительного ЛЦР, что приводит к погрешности результата

преобразований. Фактически мы наблюдаем разность спектрограмм реального и дополнительного ЛЦР. Фазы сигналов зависят от расстояния между ними. Максимальная величина погрешности определяется отношением спектральных амплитуд, и она различна для разных частот спектра.

Спектрограмма рис.1б получена из синограммы рис.2а. Отсекание части временного отклика привело к погрешности преобразования, которая хорошо видна при  $\varphi=0$ .

На этом завершим определение основных терминов и понятий и переходим к описанию метода измерений.

Исследуемый объект последовательно облучается набором из  $N+1$  монохромных частот  $F_n$  в диапазоне от  $F$  до  $F+\Delta F$ . Шаг перестройки частоты равен  $dF$ , соответственно диапазон свипирования частоты  $\Delta F=NdF$ , а частоты  $F_n=F+ndF$   $n=0\dots N$ . Обозначив через  $F_0$  центральную частоту и соответственно изменив номера индексов, получим диапазон перестройки в виде  $F_0\pm\Delta F/2$ , а частоты  $F_n=F_0+ndF$   $n=-N/2\dots N/2$ . В свою очередь это можно представить как бесконечный ряд последовательности частот, умноженный на прямоугольное частотное окно  $Q_n$ , коэффициенты ок-на  $q_n$  равны 1, для  $n=-N/2\dots N/2$  и 0 вне этого интервала. Оба представления идентичны и в дальнейшем будут применяться в зависимости от удобства записи.

При облучении частотой  $F_n$  на вход приёмника поступает сигнал  $u_n$ , амплитуда которого определяется интерференцией сигнала отраженного от объекта и помех от местных предметов и конечной развязкой между приемным и передающим трактами. В результате для каждого угла об-лучения  $\varphi$  будет получена последовательность  $U_n$  состоящая из  $N+1$  отсчётов  $u_n$ . Применяя к полученной последовательности комплексное дискретное преобразование Фурье, получим во вре-менной области последовательность  $U_k$  из  $N+1$  отсчётов, представляющую отклик во временной области от воздействия импульсного сигнала, спектр



которого соответствует  $Q_n$ . Амплитуды отсчетов равны:

$$u_k = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N q_n u_n e^{i \frac{2\pi}{N+1} kn} \quad (1)$$

Измерения выполнялись в частотной области и (1) соответствует уравнению анализа [3], для возврата в частотную область будет применено уравнение синтеза, что зеркально преобразованиям для измерений, выполненных во временной области. Интервал между отсчетами во временной области равен  $dT=1/\Delta F$ , и каждый отсчет соответствует времени  $T_k=kdT$ ,  $k=0\dots N$ , соответственно в пространстве расстояние между отсчетами равно  $dD=c/2\Delta F$ , дальность до отсчета равна  $D_k=ck/2\Delta F$ , ( $c$  – скорость света). Последовательность  $U_k$ , периодическая, её временной период равен  $T=1/dF$ , или по дальности  $D=c/2dF$ . Периодичность последовательности задаёт жесткие требования на допустимую максимальную величину шага по частоте  $dF$ , обеспечивающую отсутствия перекрытия временных последовательностей на дальности размещения объекта.

В (1) введено частотное окно  $Q_n$ , которое выделяет  $N+1$  отсчетов из их бесконечной последовательности. Результат преобразования Фурье произведения функции – свертка их спектров. При применении прямоугольного частотного окна спектр во временной области будет содержать боковые лепестки. Уровень первого лепестка равен -13 дБ. Выбор других частотных окон позволяет снизить уровень боковых лепестков до -70 дБ, но при этом снижается разрешающая способность по дальности, что эквивалентно снижению верхней частоты спектра во временной области. Эти вопросы подробно рассмотрены в [3].

Функция  $U(T)$  соответствует входному напряжению импульсного стенда, работающего на частоте  $F_0$ , со спектром сигнала  $Q_n F_n$ . Выполняя преобразование (1) для всех углов облучения и выбрав отсчеты, соответствующие по времени прихода сигналу отраженному от объекта, получим диаграмму рассеяния, аналогичную измеренной на импульсном стенде. Для примера на рис. 4 приведена

измеренная для частоты  $F_0 = 5\text{ГГц}$  ( $\Delta F = 1\text{ГГц}$ ) индикатриса обратного рассеяния прямоугольной пластины  $200 \times 200\text{мм}$ .

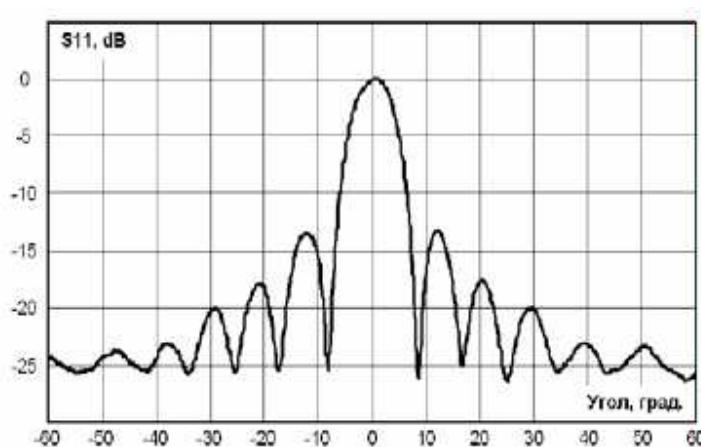


Рис.4. ДОР пластины  $200 \times 200\text{мм}$

Во временной области можно выбрать последовательность  $U^s(T)$  отсчетов, соответствующих времени прихода сигнала отраженного от объекта, его элемента или выбранного набора ЛЦР, а остальные отсчеты обнулить. Это соответствует стробированию сигнала в импульсных системах. Временное окно обнуляет отражения от источников помех, расположенных вне его границ, и снижает уровень шума последовательности временных отсчетов. Шумовая составляющая этой последовательности возникает в результате преобразования Фурье данных частотной области, имеющих погрешность, вызванную ограниченной точностью их измерения и цифрового представления.

Применяя к стробированной последовательности отсчетов уравнение синтеза, получим в частотной области последовательность  $U^s$  отсчетов  $u_n^s$ , соответствующих частотному спектру рассеяния объекта, или выбранного набора ЛЦР, для данного угла облучения.

$$u_n^s = \frac{1}{q_n} \sum_{k=0}^K u_k e^{i \frac{2\pi}{K+1} kn} \quad (2)$$

В уравнении синтеза (2) отсутствуют множители временного окна, его можно

рассматривать как записанное для бесконечной последовательности, у которой отброшены нулевые члены.

Формально (2) вычисляет частотную характеристику рассеяния для всех частот  $F_n$ , на которых было выполнено измерение. Однако в (1) отсчёты были умножены на коэффициенты  $q_n$ . Для окон с малым уровнем боковых лепестков значения  $q_n$  малы на краях частотного окна. В результате значения суммы в (2) для крайних частот диапазона мало и может иметь недопустимую погрешность. Если данные необходимы для всего диапазона и отсутствует возможность выполнить измерения в более широком диапазоне частот, последовательность  $U_n$  в (1) можно дополнить отсчетами, полученными на основе её экстраполяции. При этом соответственно изменяются значения  $N$  и  $\Delta F$ . Естественно, синопграмма будет непредсказуемо искажена, а область достоверных результатов в частотной области ограничена только фактическим диапазоном измерения.

В соответствии с теоремой Котельникова по дискретному спектру (2) можно вычислить непрерывный спектр рассеяния объекта. Умножение его на спектр РЛС формирует спектр отраженного сигнала вызванного облучением РЛС. Подставляя в (1) значения из (2), а вместо  $Q$  спектр РЛС получим временной отклик от цели для спектра сигнала РЛС.

Если в выражениях (1) и (2)  $K=N$ , то (2) определяет последовательность отсчётов для ряда соответствующего сетке частот, на которых выполнялось измерение. Как отмечалось выше, (1) определяет функцию с периодом повторения равным  $D=c/2dF$ . Значение  $D$  должно превышать дальность до исследуемого объекта, что требует выполнение условия  $dF < 2D/c$ . Соответственно для полосы частот  $\Delta F$  значение  $N = \Delta F/dF$  достаточно велико. Это значение всегда превышает необходимое число членов ряда достаточного для представления в дискретном виде спектра рассеяния объекта.

Расстояние между отсчётами  $u_n^s$  в (2) равно шагу по дальности  $dD=c/2\Delta F$ . Если

электрическая длина объекта равна  $D_3$ , то во временной области отличны от нуля только  $N1+1$  отсчётов, где  $N1=D_3/dD$ . Заменяя в (2) значение  $N$  на  $N1$ , получим уравнение синтеза, связывающее временную функцию из  $N1+1$  отсчетов с периодом повторения по дальности, равным  $D_3$ , её преобразование Фурье формирует дискретную функцию в частотной области с минимальным числом отсчётов, необходимых для описания функции рассеяния объекта в полосе частот  $\Delta F$ .

Перевод результатов измерений в уровни ЭПР выполняется калибровкой по эталонному отражателю в виде:

$$\sigma[F_n, \varphi_m] = \sigma_3[F_n] \frac{|u_s[F_n, \varphi_m]|^2}{|u_3[F_n]|^2},$$

где –  $\sigma_3$  – ЭПР эталонного отражателя для угла  $\varphi_m$  и частоты  $F_n$ ;  $u_s$  и  $u_3$ , измеренные амплитуды сигнала для объекта и эталонного отражателя, соответственно.

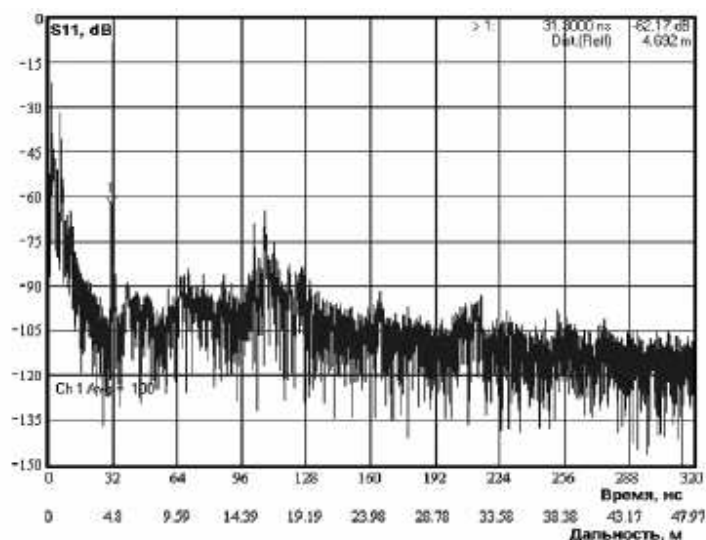


Рис.5. Фон зала. На дальности 4,69м отклик от сферы Ø 100мм

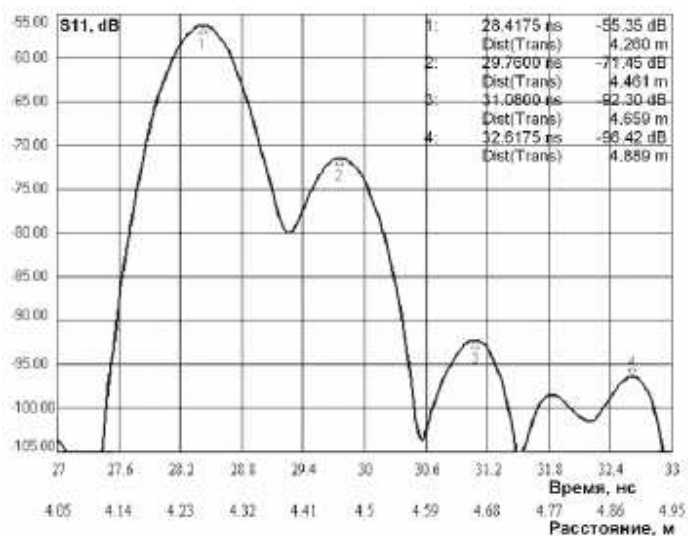


Рис. 6 Отклик от сферы Ø 150мм.

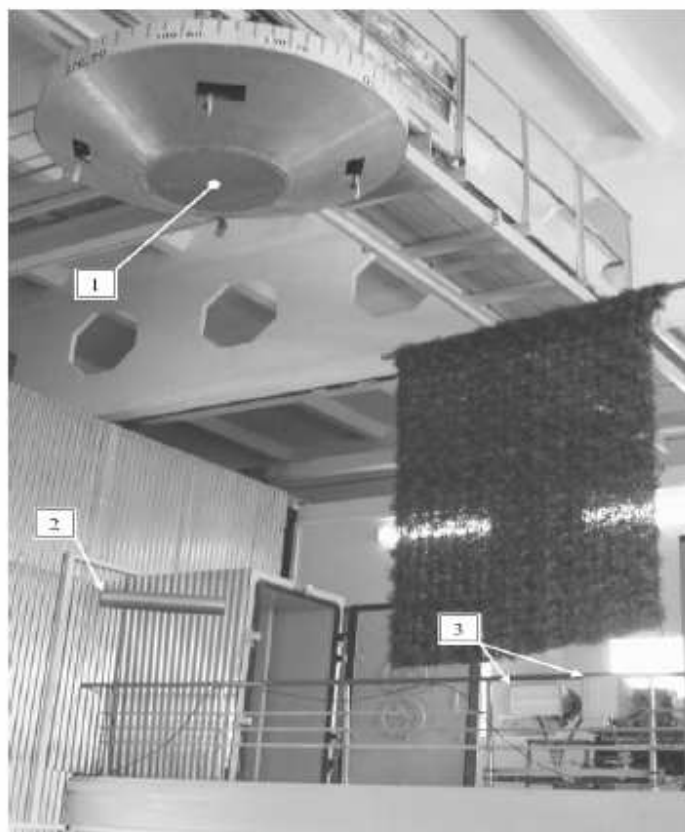


Рис. 7 Контроль глубины зоны измерений: 1 – стенд; 2 – цилиндр; 3 – антенны.

Возможности измерений методом частотно-временных преобразований рассмотрим на примере стенда 50СТ-126. Стенд выполнен на основе измерителя S параметров типа PNA-L фирмы Agilent Technologies и позволяет выполнять

измерения в диапазоне частот от 0,5ГГц до 20ГГц. Стенд предназначен для измерения характеристик ЛЦР в условиях производственных помещений. Исполнение стенда переносное, но одно из его рабочих мест оснащено поворотным устройством, расположенным на потолке помещения. При измерениях объект подвешивается на диэлектрических фалах. Специальная рама позволяет совмещать исследуемый ЛЦР с осью вращения. Учитывая, что размеры исследуемых ЛЦР малы, стенд не имеет коллиматора.

Об уровне безэховости, при котором выполнены измерения, можно судить уже по тому, что одна из боковых стен помещения покрыта металлошифером (рис. 7). Дальность до этой стены от измерительной оси около 4м. Все результаты, приведенные в данной статье, получены при измерении в этих условиях. В приведённых ниже примерах для приёма и передачи использована общая антенна типа Пб-23М, это ограничило диапазон измерений пределами 0,85-17ГГц.

На рис. 5 приведен и фон зала во временной области. Дальности 0 соответствует отражение, вызванное рассогласованием антенны. На дальности 16м – отражения от задней стены зала. На дальности 32м подъём фона вызванный многократными отражениями. На дальности 4,69м виден отклик от эталонной сферы диаметром 100мм, а на рис. 6 показан отклик от сферы диаметром 150мм в растянутом масштабе по дальности.

Во временной области первый максимум отклика соответствует  $\sigma = \pi r^2$ , последующие вызваны поверхностной волной, огибающей сферу. По мере снижения разрешения по дальности, максимумы сливаются и в пределе переходят к известной зависимости ЭПР сферы от частоты (кривая Ми).

Стандартная программа компенсации фона (векторное вычитание предварительно измеренных значений) снижает фон на 18дБ, при отдельных антеннах для приёма и передачи и исключения входного направленного ответвителя, уровень фона снижается ещё на 15дБ. Это определяет уровни ЭПР, для которых можно выполнять измерения в данных условиях.

Допустимая глубина зоны измерений определяется запаздыванием сигнала, отраженного от от местных предметов. Способ контроля показан на рис. 7. К платформе стенда 1, подвешен цилиндр 2, который облучается антенной 3. Цилиндр формирует диаграмму рассеяния широкую в вертикальной плоскости и узкую в горизонтальной. При повороте цилиндра на угол  $\pm 45^\circ$ , максимум диаграммы отклоняется на угол  $\pm 90^\circ$ , при направлении максимума на источник помехи возникает запаздывающий отклик.

Контрольные измерения показали, запаздывание отклика равно 2м, при дальности до объекта 5м и 1,5м при дальности 8м. Амплитуда второго отклика на 45 дБ ниже амплитуды зеркального отражения от цилиндра.

Измерение характеристик рассеяния методом частотно-временных преобразований существенно снижает требования к уровню безэховости. Приведем три примера, демонстрирующие возможность измерений рассеяния в условиях, показанных на рис.7. Все измерения выполнены с общей антенной для приёма и передачи и без применения режима компенсации фона.

**Пример первый** – оценка влияния краевой [4] и поверхностной волны [5] на рассеяние кромок металлической пластины. На рис. 8 показаны синопаммы (а, б) металлической пластины размером 455×665×4мм. Кромка 455 мм совпадает с осью вращения стенда, что обеспечивает постоянство  $E_i$  при изменении угла облучения. В секторе углов облучения  $-180^\circ..0^\circ$  это передняя кромка пластины, а для сектора  $0^\circ+180^\circ$  - задняя. Измерения выполнялись с  $\Delta F=3\text{ГГц}$ . Результат измерения соответствует рассеянию для центральной частоты диапазона свипирования  $F_0$ . Достоверность этого подтверждена контрольными измерениями с  $\Delta F=9\text{ГГц}$ . Сечения синопамм для дальности 8,25м (ось вращения) и горизонтальной поляризации (вектор  $E$  перпендикулярен кромке пластины), для  $F_0=2,5\text{ГГц}$  и  $F_0=11,5\text{ГГц}$  показаны на рис.8 в, г.

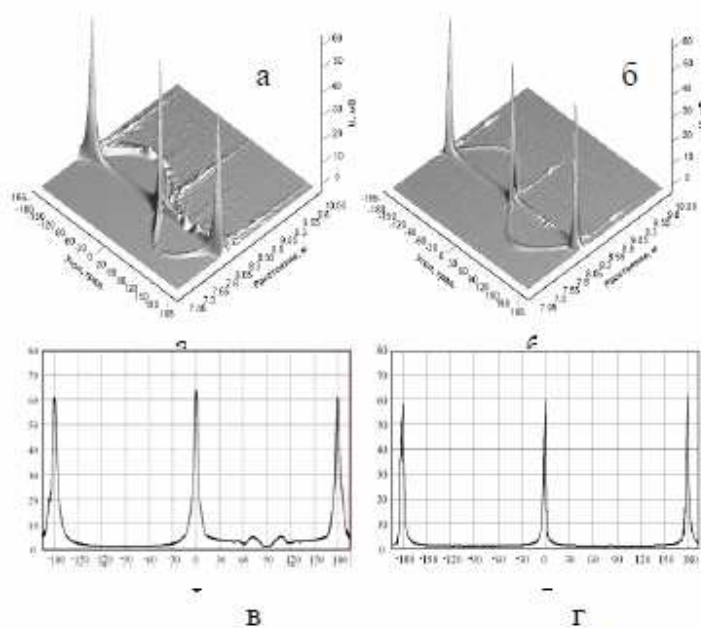


Рис. 8. Синограммы и их сечения  $D=8,2\text{ м}$  ;  
 а, в –  $F_0 = 2,5 \text{ ГГц}$ ; б, г –  $F_0 = 11,5 \text{ ГГц}$

В более крупном масштабе эти сечения приведены на рис. 9 для вертикальной поляризации и рис. 10 для горизонтальной поляризации. Увеличение рассеяния от задней кромки (рис.9) вызвано краевой волной. На рис. 10 виден эффект интерференции равномерной части тока и тока поверхностной волны. На рис. 10б видно изменение соотношений уровней рассеяния от передней и задней кромок, вызванное изменением отношения толщины пластины к длине волны, при этом суммарное рассеяние от равномерной части тока остаётся без изменения.



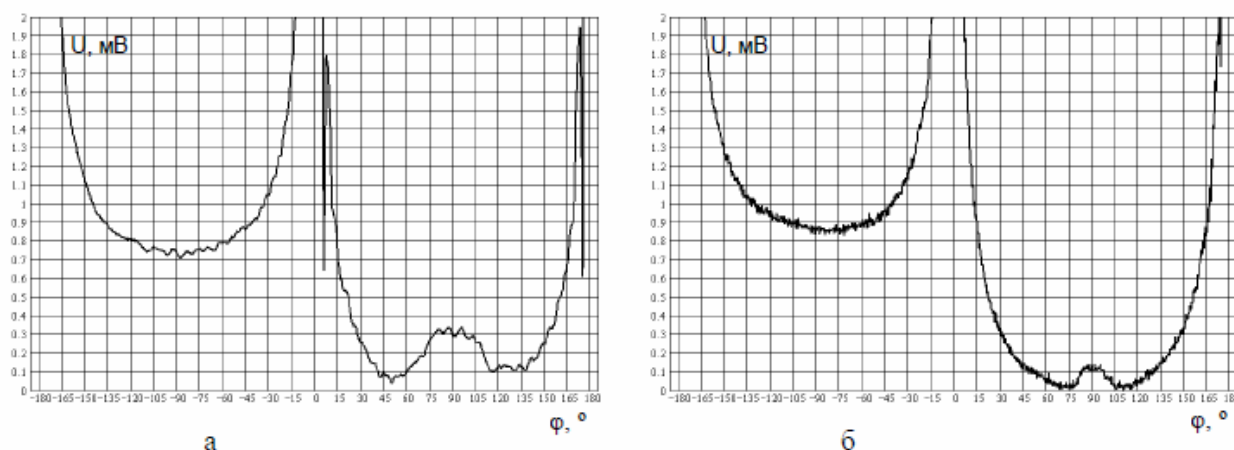


Рис. 9. Сечение синогаммы: а –  $F_0=2,5$  ГГц; б –  $F_0=11,5$  ГГц; Поляризация вертикальная

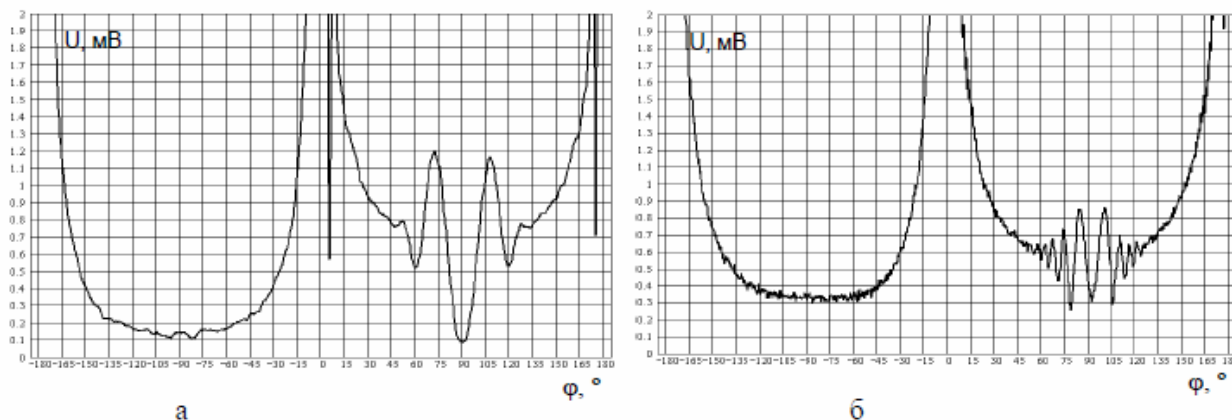


Рис. 10. Сечение синогаммы: а –  $F_0=2,5$  ГГц; б –  $F_0=11,5$  ГГц; Поляризация горизонтальная

У бесконечно тонкой пластины плотность поверхностного тока на её сторонах одинакова [5]. Зависимость от угла облучения и длины пластины отношения суммарной плотности поверхностного тока в районе задней кромки к плотности равномерной части тока можно записать в виде:

$$A(\theta, kb) = A(\theta) \cdot e^{-\frac{\pi}{W}(kb) + i(\beta(\theta) + 3\pi/4)}$$

(3)

Где  $A(\theta)$  – угловая зависимость амплитуды, соответствующая функциям  $f$  и  $g$  в (4);  $\theta = \varphi - \pi/2$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $W$  – волновое сопротивление пространства;  $b$  – горизонтальный размер пластины.

$\beta(\theta)$  – запаздывание по фазе, вызванное увеличением дальности до передней кромки  $D_0$  при повороте пластины на угол  $\theta$ , с учетом сферичности фронта

падающей волны.

Из геометрии задачи 
$$\beta(\theta) = k(b(1 - \cos(\theta)) + \sqrt{D_0^2 + (b \cdot \sin(\theta))^2} - D_0)$$

Из общих соображений можно полагать, что при  $b \rightarrow 0$ , плотности поверхностного тока равна плотности равномерной части тока и  $A(0)=1$ .

Осцилляция  $A(\theta, kb)$  вызвана интерференцией равномерной части тока  $J_1$  и поверхностного тока  $J_2$ , при изменении угла облучения. Разность фаз токов равна:

$$\arg(J_1 - J_2) = 3\pi / 4 - \beta(\theta)$$

Рассчитанная по (3) зависимость отношений амплитуд тока от отношения длины стороны к длине волны при  $\theta=0$ , приведена на Рис.11 (сплошная линия). Пунктирная линия соответствует регрессии, рассчитанной в системе Mathcad на основе измеренных данных (точки).

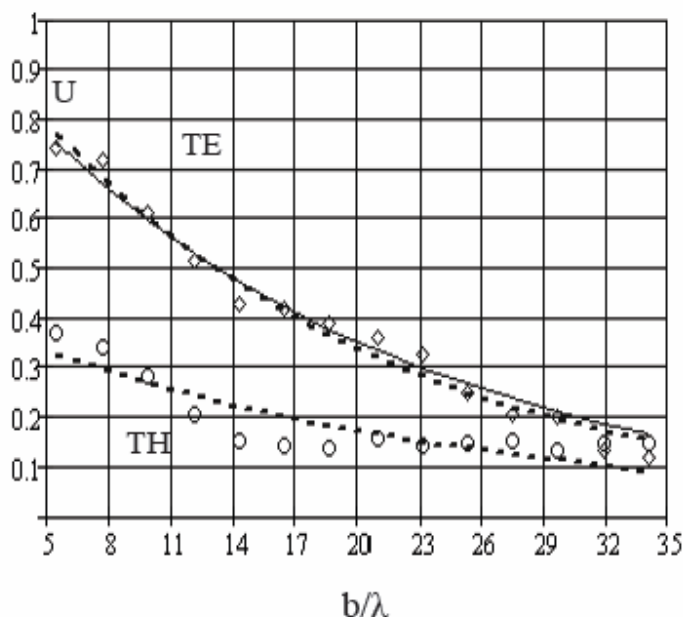


Рис. 11. Расчетное и измеренное отношение плотностей тока.

**Пример второй** – для снижения радиолокационной заметности объекты могут частично покрываться радиопоглощающим материалом (РПМ). Несогласованная граница области покрытой РПМ вызывает рассеяние. Для его измерения на половину одной из сторон металлической пластины размером 1000×500×1,5 мм

нанесен РПМ 500×500×6 мм. На рис.12 приведены синопаммы этой модели измеренные в диапазоне частот 1÷12 ГГц. Граница раздела совпадает с осью вращения. В диапазоне углов облучения ±90° на дальности 4,85м виден след отклика от границы РПМ-металл. Зависимость амплитуды следа от угла приведена на рис.13.

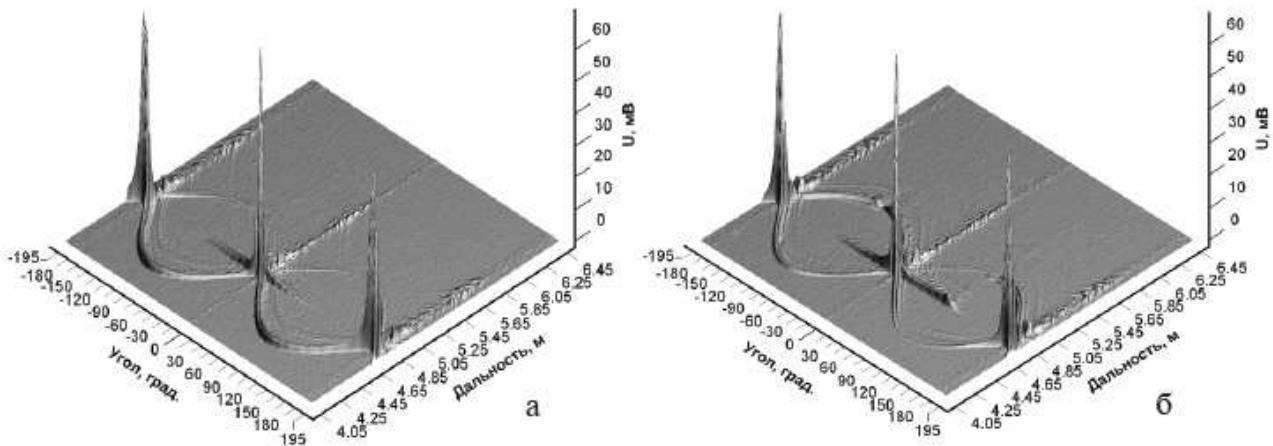


Рис. 12. Синопаммы пластины частично покрытой РПМ:  
а – поляризация вертикальная, б – поляризация горизонтальная.

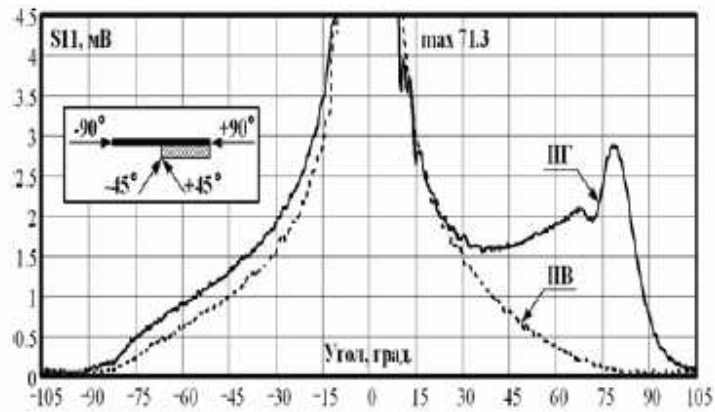


Рис. 13. Сечение синопаммы D=4,85м.

На рис.14 приведены сечения синопамм для углов облучения ±45°. Амплитуда отклика от несогласованной границы РПМ – металл может превышать амплитуду откликов от краев пластины. При горизонтальной поляризации нанесение РПМ в районе передней кромки снижает отклик от задней кромки (рис. 14б).

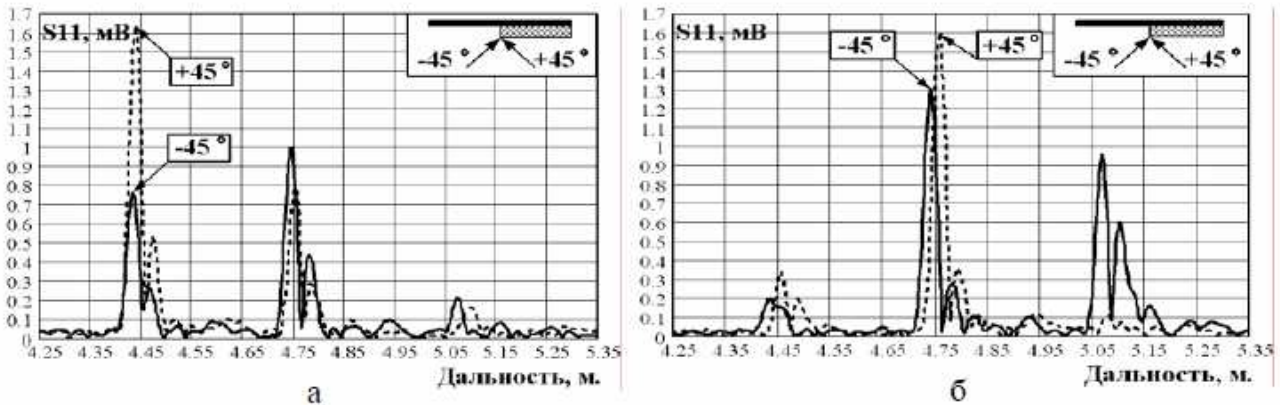


Рис.14. Отклики от границы РПМ - металл и кромки пластины:  
а – поляризация вертикальная, б – поляризация горизонтальная.

**Пример третий.** Одна из сторон пластины 200×200 мм покрыта тонким резонансным РПМ РАН-2. На рис. 15 показано измеренное отношение ЭПР сторон пластины. Для сравнения пунктиром приведён график зависимости коэффициента зеркального отражения этого РПМ, измеренный в Институте теоретической и прикладной электродинамики РАН.

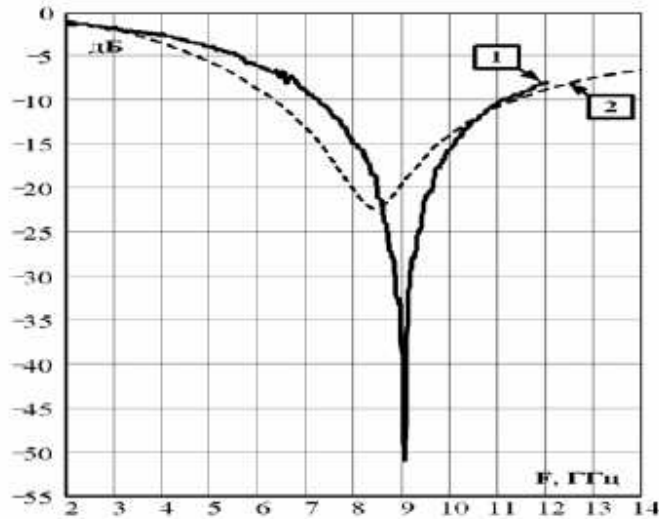


Рис. 15. Коэффициент зеркального отражения РПМ РАН-2 (---), отношение ЭПР сторон пластины (—)

Различие в результатах вызвано тем, что при измерении ЭПР зеркальное рассеяние суммируется с рассеянием от кромок пластины.

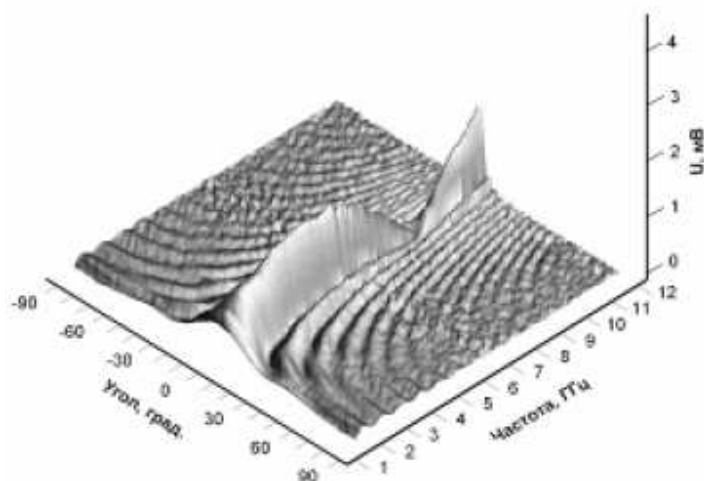


Рис.16. Спектрограмма пластины покрытой РПМ РАН-2

На рис. 16 приведена спектрограмма, измеренная для стороны пластины, покрытой РПМ. За пределами главного лепестка не наблюдается резонансного снижения уровня зеркального отражения вблизи частоты 9 ГГц. После частоты 9 ГГц видно слияние главного и первого бокового лепестков. Это связано с резонансной частотной характеристикой РПМ.

В районе резонансной частоты РПМ (8,5 ГГц) меняется положение фазового центра зеркального отражения, а фаза отражения от кромок изменяется мало. На частоте 9 ГГц эти отражения противофазные. Изменение сдвига фаз вызывает снижение ширины зеркального максимума на частотах ниже 9 ГГц и его уширение на более высоких частотах.

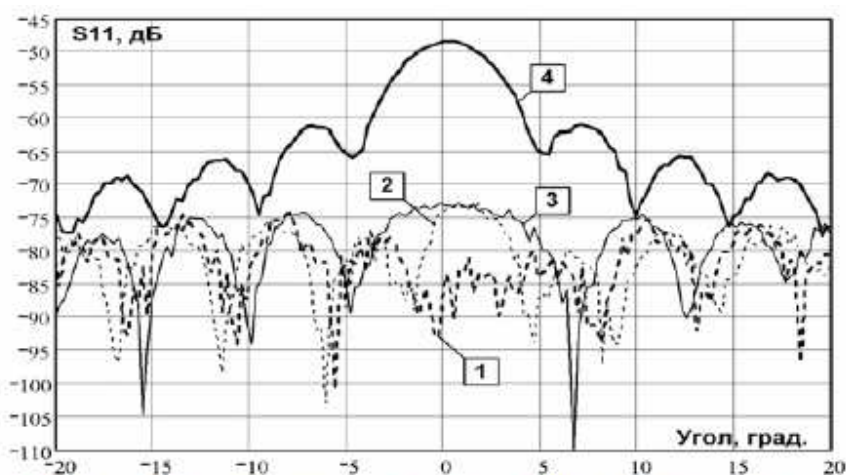


Рис. 17 Обратное рассеяние пластиной покрытой РПМ “РАН-2” на частотах: 1 – 9 ГГц, 2 – 8,7 ГГц, 3 – 9,34 ГГц и стороны без покрытия 4 – 9 ГГц

На рис. 17 приведены графики зависимости амплитуды обратного рассеяния от угла облучения для частот 8,7 ГГц, 9,0 ГГц и 9,34 ГГц и график на частоте 9 ГГц для стороны без покрытия.

Волнистость линий на графике вызвана небольшим раскачиванием пластины при измерениях на гибкой подвеске. На частоте 9 ГГц уровень зеркального отражения для стороны с РПМ ниже уровня боковых лепестков.

**Заключение.** Метод частотно-временных преобразований позволяет выполнять измерения рассеяния в условиях слабой безэховости. Метод обеспечивает высокую информативность результатов измерений. Метод позволяет:

- за один цикл одновременно измерять характеристики рассеяния всего объекта и его элементов в широкой полосе частот (спектр рассеяния);
- выполнять измерения при минимальных требованиях к внешним условиям, в частности выполнять измерения в производственных помещениях, без покрытия стен РПМ;
- выявлять ЛЦР, измерять их координаты и характеристики рассеяния;
- контролировать эффективность мер, направленных на устранение отдельных ЛЦР, априорно оценивать достигаемый эффект по снижению ЭПР объекта после

устранения выбранного набора ЛЦР;

- выполнять экспериментальную отработку ЭПР элементов объекта без создания специальных малоотражающих макетов.

По измеренным спектральным характеристикам рассеяния можно вычислять радиолокационную заметность объекта в зависимости от рабочей частоты РЛС, спектра её сигнала, алгоритма обработки.

Основная цель, которую ставили авторы, это экспериментально подтвердить возможность и исследовать достигаемые характеристики при измерении ЭПР методом частотно-временных преобразований в предельно плохих условиях (помещение с высоким уровнем отражений от местных предметов, общая антенна для передачи и приёма сигнала). Безусловно, повышение безэховости помещения и увеличение развязки между антеннами снизит уровень фона и расширит предел измерений малого уровня ЭПР.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. - М.: Сов. радио, 1975, с. 248.
2. 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, с. 43-56.
3. Стивен Смит, Цифровая обработка сигналов. - Москва,: Додэка-XXI, 2008, с 720.
4. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. - М.: Сов. Радио, 1962, с. 240
5. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн.- М.: Энергия, 1967 с. 376.