

ИЗМЕРЕНИЕ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА КРОМКАХ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ

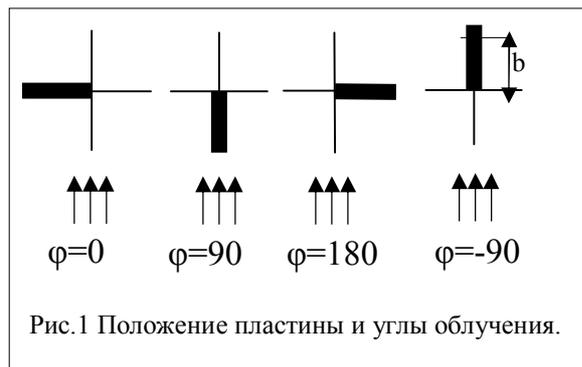
В. С. Бачурин, В. Д. Пышный, А. Д. Деменёв
АО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей» ОАО «ОКБ Новатор» main@okb-novator.ru

Приведены результаты измерений обратного рассеяния электромагнитной волны на кромках металлической пластины. Сигнал, рассеянный пластиной, представлен в виде трёх составляющих: зеркальной и рассеяний от кромок пластины. Выявлены особенности рассеяния от задней кромки. Показано, что поверхностная волна снижает уровень обратного рассеяния при скользющем угле облучения, что может привести к недооценки её влияния в секторе углов.

Для снижения радиолокационной заметности объектов им придаётся форма, исключаяющая зеркальное отражение радиолокационного сигнала в наиболее вероятных секторах облучения. Основной вклад в отражённый сигнал начинает вносить рассеяние на гранях и других неоднородностях поверхности объекта. Методы физической оптики дают удовлетворительные результаты для зеркального и близкого к нему направления, но для скользящих углов погрешность вычислений недопустимо велика, что вызвано неадекватным описанием токов, наводимых на поверхности вблизи границ освещенной области.

Выражения для поверхностного тока на гладких телах вблизи границы тени были предложены В. А. Фоком [1]. Решение задачи на основе интегральных уравнений приведено в [2, 3]. Повышение точности расчета методом физической оптики предложено П. Я. Уфимцевым путем учета краевых волн [2], соответствующих неравномерной части тока. Расчет характеристик рассеяния путем разбиения объекта на подобласти и с учетом поверхностных волн изложен в [4].

Экспериментальное исследование рассеяния на ребре, клине, границе раздела участков поверхностей с различным покрытием и других локальных центрах рассеяния (ЛЦР) представляет практический интерес. Для их проведения авторами разработана методика и создан измерительный стенд [5] позволяющий выделять и измерять дифракционные характеристики отдельных ЛЦР. Ниже рассмотрены результаты измерений обратного рассеяния кромками проводящей пластины. При измерениях пластина вращалась вокруг вертикальной оси. И вертикальная поляризация (ПВ) соответствует ТЕ волне (вектор \vec{E} параллелен кромке), а горизонтальная (ПГ) -ТН- волне (вектор \vec{E} перпендикулярен кромке).



Измерения обратного рассеяния выполнены методом частотно-временных преобразований [5]. Исследуемый объект последовательно облучается набором из 1600 квазимонохромных частот в диапазоне от $F-\Delta F/2$ до $F+\Delta F/2$ с шагом перестройки dF . Комплексная амплитуда сигнала, поступающая на вход приёмника, запоминается. Комплексное обратное преобразование Фурье переводит измеренную последовательность отсчетов во временную область. Непосредственное преобразование последовательности приведет к появлению во временной области

боковых лепестков с уровнем -13дБ вызванных сверткой с прямоугольным частотным окном, формирующим отсчеты. Для их снижения до уровня -65 дБ использовано частотное окно Кайзера.

Измерения выполнены при изменении средней частоты F от 2,5 ГГц до 15,5 ГГц с через 1 ГГц (14 точек) с $\Delta F=3$ ГГц, что обеспечивает разрешающую способность по дальности около 100 мм (по уровню -6 дБ). Соответствие результата измерений средней частоте F проверено экспериментально: увеличении полосы частот до $\Delta F=9$ ГГц, не изменяет конечный результат,

но соответственно сужается диапазон частот, в котором могут быть получены данные. Размер пластины $a \cdot b \cdot c = 455 \times 665 \times 4$ мм.

Во временной области результаты измерений можно представить в виде синограммы [5] – трехмерного графика в декартовой системе координат. Оси соответствуют дальности, углу об-

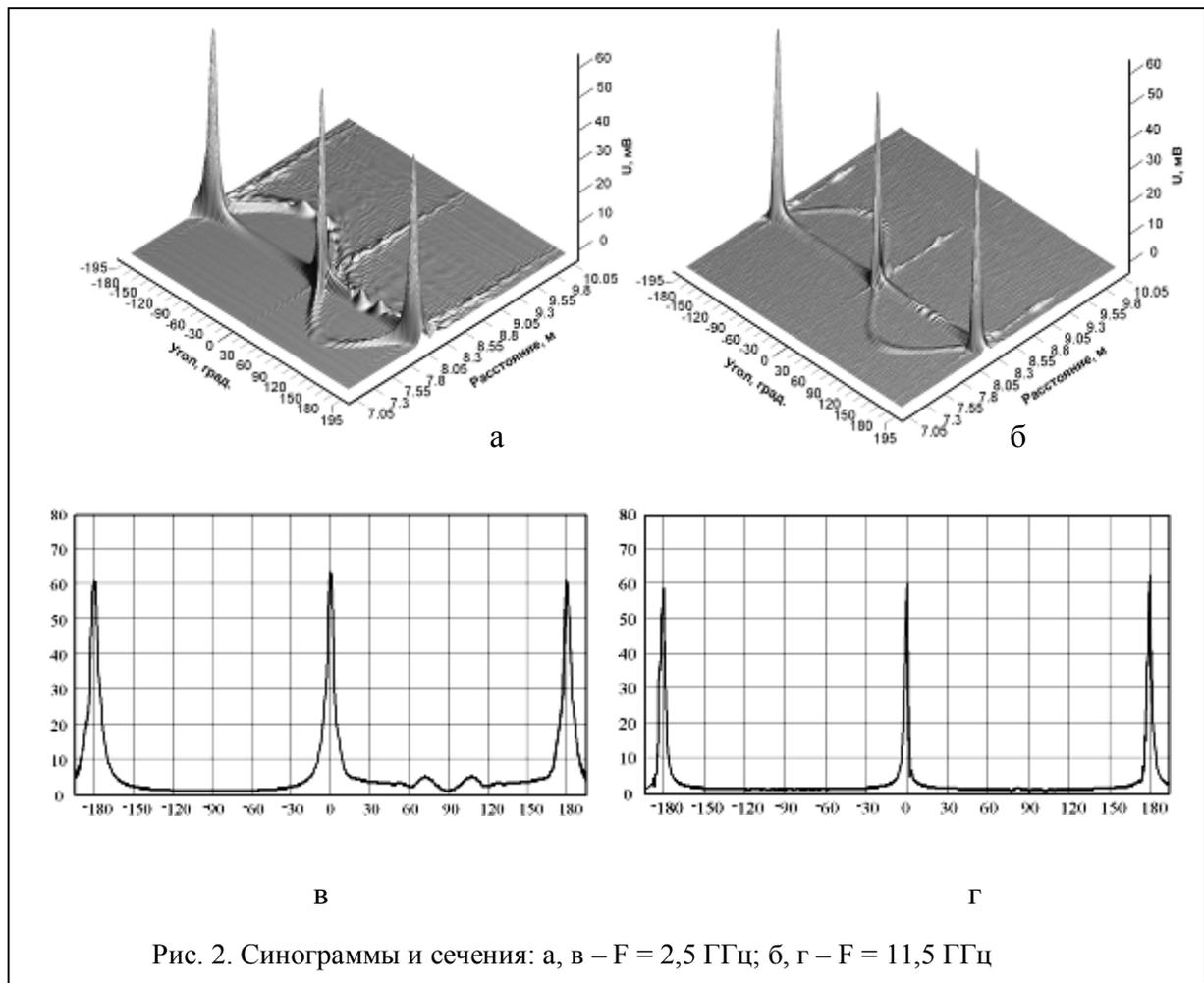


Рис. 2. Синограммы и сечения: а, в – $F = 2,5$ ГГц; б, г – $F = 11,5$ ГГц

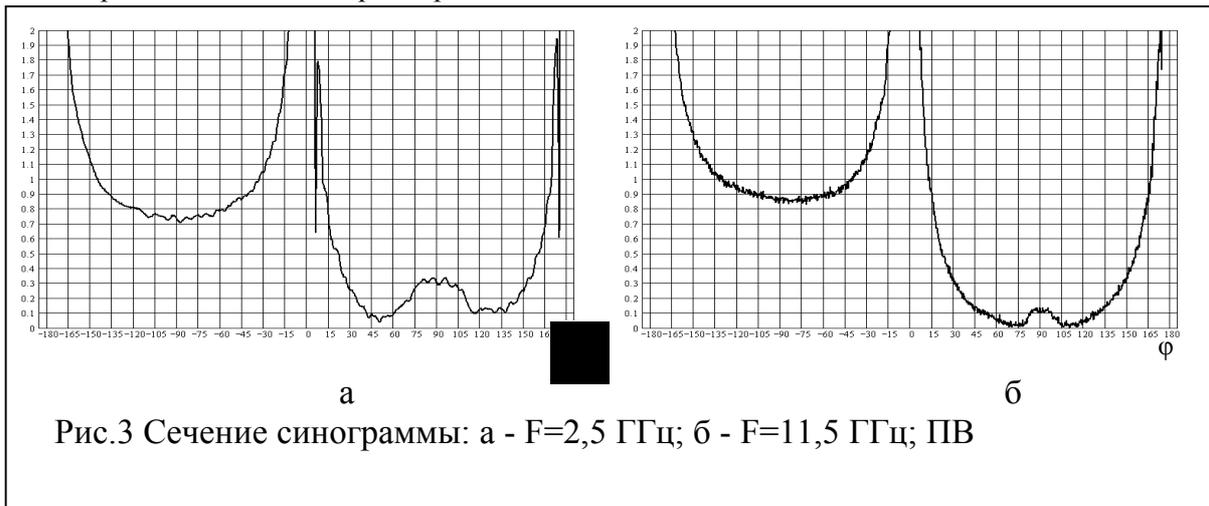
лучения и амплитуде сигнала. Данное представление удобно тем, что стационарный ЛЦР формирует на плоскости угол-дальность синусоидальный след, амплитуда которого равна расстоянию от ЛЦР до оси вращения, а фаза его начальному угловому положению. При совпадении ЛЦР с осью вращения след образует прямую линию.

При измерениях пластина подвешивалась к поворотной платформе измерительного стенда на тонких диэлектрических нитях. Исследуемая грань ($a=455$ мм) совмещалась с осью вращения. В процессе измерения эта грань остается неподвижна, что обеспечивает постоянство амплитуды падающего поля. Для вертикальной поляризации, поляризационный вектор параллелен грани, для горизонтальной поляризации – перпендикулярен.

Соответствие углов облучения и положения пластины показано на рис.1. Максимумы зеркального отражения соответствуют углам $\varphi=0^\circ$ и $\varphi=\pm 180^\circ$. При положительных углах облучения исследуемая грань соответствует задней кромке, при отрицательных – передней. На рис.2 приведены синограммы пластины, измеренные на частотах $F=2,5$ ГГц и $11,5$ ГГц. Их сечения для дальности $8,2$ м приведены на рис.2в и рис.2г. Поляризация горизонтальная (ПГ).

След от исследуемой грани формирует прямую линию, соответствующую постоянной дальности, след от противоположной грани – синусоиду с амплитудой 660 мм. Всплески соответствуют зеркальному отражению, след за ними, вызван излучением затухающего поверхностного тока, который течет после воздействия импульса электромагнитного поля. Установлен-

ное частотное окно не полностью подавляет временные лепестки при преобразовании Фурье и на синограмме виден след перед зеркальными всплесками.



На рисунках видно хорошее разделение зеркального отражения и рассеяния от граней пластины. Это подтверждается отсутствием дифракционных минимумов уже при отклонении угла облучения на $\pm 10^\circ$ от зеркального максимума. В дальнейшем будут рассматриваться только углы облучения близкие к скользящим, и методика выделения рассеяния кромками для углов близких к зеркальному здесь не рассматривается.

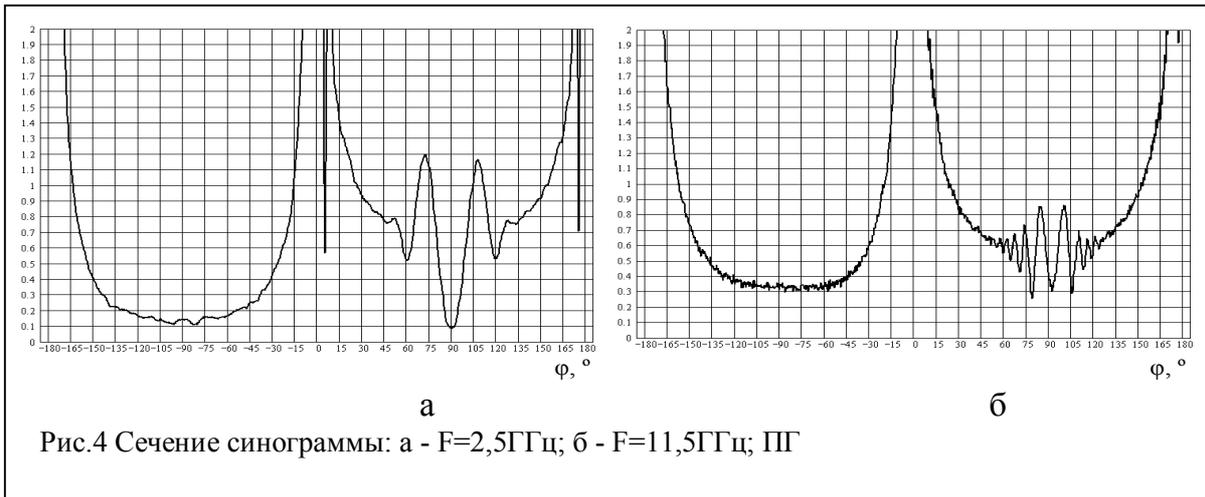
На рис.3 приведены сечения синограмм в более крупном масштабе для ПВ, а на рис.4 – для ПГ.

Для дальнейшего изложения полное рассеянное поле удобно представить в виде трех слагаемых:

$$E^s = E^s_m + E^s_{b1} + E^s_{b2}, \quad (1)$$

где E^s_m – зеркальная составляющая, E^s_{b1} и E^s_{b2} – напряженности поля рассеянного кромкой 1 (передней) и 2 (задней), соответственно.

Данное представление авторы считают примитивным, но оно удобно при выполнении работ по снижению радиолокационной заметности. Так применение покрытия радиопогло-



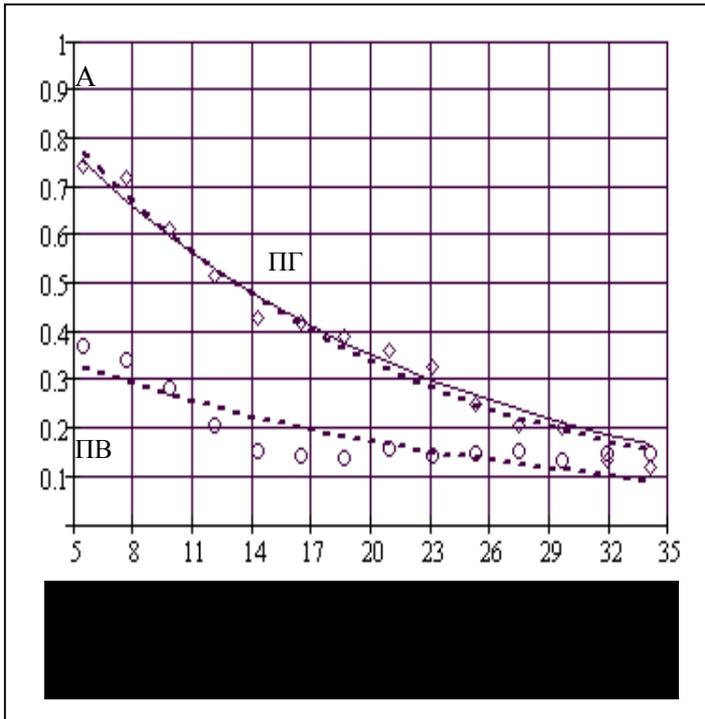
щающим материалом может подавить зеркальную составляющую, но привести к увеличению рассеяния волны на кромке. Примеры этому можно найти в [5, 6]. Это представление достаточно хорошо согласуется с данными измерений, если обеспечена высокая разрешающая способность по дальности, достаточная для представления пластины в виде протяженного объекта (цели).

Для удобства дальнейшей записи добавим к записи составляющих полей в (1) индексы “=” для ВП и “ \perp ” для ПГ (E параллельно, или перпендикулярно кромке).

Если выделить рассеяние от кромок, решая задачу в приближении физической оптики, то получим, для бесконечно тонкой прямоугольной пластины $E_{b1}^{s=}(\varphi) = E_{b2}^{s=}(\varphi + \pi)$ и $E_{b1}^{s\perp}(\varphi) = E_{b2}^{s\perp}(\varphi + \pi)$. При скользких углах $E_{b1}^{s\perp}(0) = E_{b2}^{s\perp}(\pi) = 0$. Для тонкой пластины конечной толщины в результате зеркального отражения от торца поле $E_{b1}^{s\perp}(0) = E_{b2}^{s\perp}(\pi) = \Delta \neq 0$. Значение Δ легко вычисляется, но для дальнейшего нет необходимости знать его значение. Существенно то, что на эту величину уменьшается поле от противоположной кромки. В результате сохраняется равенство:

$$E_{b1}^{s\perp}(0) + E_{b2}^{s\perp}(\pi) = E_{b1}^{s=}(0) + E_{b2}^{s=}(\pi) = const \quad (2)$$

Это даёт некоторую постоянную величину, к которой можно будет в дальнейшем выполнить нормировку. Отметим, что E_b^s гладкие функции, достигающие минимума при скользком угле облучения.



При решении задачи методом интегральных уравнений [3], или учитывая краевые волны [2], получаем при ПВ увеличение уровня рассеяния для скользких углов облучения. Отметим близость угловой зависимости функции g^1 в [2], рассчитанной для клина с углом раскрытия $\alpha=3/4\pi$ и результата измерений для пластины на рис. 3. Измеренное отношение амплитуды всплеска вызванного краевой волной при $\varphi=\pi$ к константе (2) в зависимости от отношения длины пластины к длине волны (b/λ) приведено на рис. 5.

При ПГ возбуждение передней кромки падающей волной вызывает появление затухающего (неравномерного) поверхностного тока (surface current). Физически это вызвано скачком граничных условий: волна свободного пространства раз-

деляется на две независимых (если бесконечная полуплоскость) волны распространяющимся над плоскостью. При скользком угле облучения амплитуды поверхностного тока для сторон пластины равны. Рассмотрение соотношения токов для освещенной и теневой сторон выходит за рамки данной статьи. Затухание поверхностного тока вызвано потерями на излучение и омическими потерями в материале пластины. отношение суммарной плотности поверхностного тока в районе задней кромки к плотности равномерной части тока от угла облучения и длины пластины можно записать в виде:

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

Где $A(\theta)$ – угловая зависимость амплитуды, соответствующая функциям f^1 и g^1 в [2], $\theta = \varphi - \pi/2$, $k = 2\pi/\lambda$, W – волновое сопротивление пространства, b – длина стороны пластины.

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

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

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

амплитуд тока от отношения длины стороны к длине волны при $\theta=0$, приведена на рис.5 (сплошная линия). Пунктирная линия соответствует регрессии рассчитанной в системе Mathcad на основе измеренных данных (точки). При обработке измерений учитывалось, что: при $\theta=0$ разность фаз токов равна $3\pi/4$ и величина центрального минимума равна 0,707 амплитуды поверхностного тока.

Осцилляция $A(\theta, kb)$ вызвана интерференцией токов при изменении угла облучения, их разность фаз равна

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

Расчет по этой формуле приводит к хорошему совпадению положений минимумов и максимумов функции для всех частот, на которых выполнены измерения. Совпадение расчетных и экспериментальных данных при поляризации поля перпендикулярной ребру (передней кромке) можно трактовать как возбуждение передней кромки затухающей поверхностной волны вызывающей осциллирующую угловую зависимость амплитуды обратного рассеяния от задней кромки.

Угловая зависимость амплитуды, по всей видимости, может быть получена на основе интегральных уравнений по аналогии с [2]. Поверхностная волна приводит к снижению уровня рассеяния от задней кромки для ортогональной к поверхности компоненты вектора E и скользящем угле облучения. В ряде случаев это приводит к заниженной экспериментальной оценке величины рассеяния задних кромок таких элементов как крылья. Следует отметить, что вклад поверхностной волны заметен даже при $kb=200$.

Авторы выражают благодарность д.т.н. Нестерову С. М. за ряд ценных замечаний при обсуждении статьи и Батухтину Д. М. за выполнение цикла измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фок В. А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. – М., Советское радио, 1970, 520с.
2. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции. - М., Советское радио, 1962, 243с
3. Васильев Е. Н., Солодухов В. В., Федоренко А. И. Метод интегральных уравнений в задаче дифракции электромагнитных волн на сложных телах. *Electromagnetios*. 1991. v.11 №2-3. p.161-182.
4. Ковалёв С. В., Нестеров С. М., Скородумов И. А. Расчет радиолокационных характеристик объектов с учётом влияния поверхностных волн и щелевых образований. *Радиотехника и электроника*, 1998, Т.43, №1 С. 37-46.
5. Бачурин В.С., Пышный В.Д., Деменёв А.Д. RCS measurement by a method of time-frequency transformations. Пятая международная конференция “Военно-Морской флот и судостроение в современных условиях” NSN’2009, Санкт-Петербург, ЦНИИ им. акад. Крылова Сборник докладов. Электронная версия.
6. Бачурин В. С., Деменев А. Д. Пышный В. Д. Спектр рассеяния электромагнитных волн металлической пластиной покрытой резонансным РПМ. III Всероссийская конференция “Радиолокация и радиосвязь”, сборник докладов, Москва, 2009г.