

УДК 621.3.095, 537.874

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

А.М. Лебедев¹, М.Л. Обухов², И.А. Селин¹, Т.А. Фурманова¹

¹ Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), 141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., д.9

Статья поступила в редакцию 26 ноября 2019 г.

Аннотация. Все максимумы пространственного распределения двухпозиционной эффективной поверхности рассеяния металлического треугольника структурированы в семейства дифракционных конусов, имеющие одно из рёбер треугольника в качестве оси. Основной конус семейства имеет максимальные уровни ЭПР, а на его конусах-сателлитах уровень ЭПР последовательно уменьшается. Для семейств конусов, возникших в результате первичной дифракции на краях треугольника, основными являются конусы дифракционных лучей. Максимальная двухпозиционная ЭПР наблюдается в направлении луча, отражённого от треугольника, и в теневом направлении, - оба эти направления принадлежат одновременно всем трём конусам дифракционных лучей вокруг рёбер треугольника. Поле рассеяния на конусе дифракционных лучей формируется как сумма синфазных вкладов элементов ребра. Поля рассеяния на конусах-сателлитах формируются как сумма вкладов элементов ребра, разбитых на 3, 5, 7 и так далее зон Френеля. Поверхностные токи, возникающие при первичной дифракции падающей волны на краях треугольника, набегают на остальные края и также формируют дополнительные семейства дифракционных конусов. Наблюдаются и семейства дифракционных конусов, возникающие в результате встречного движения рёберных волн вдоль краёв треугольника. Основные эффекты вторичной дифракции обусловлены

именно набеганием поверхностных токов и рёберных волн на, соответственно, края и вершины треугольника.

Ключевые слова: двухпозиционная эффективная поверхность рассеяния, дифракционные конусы, зоны Френеля, первичная и вторичная дифракция, поверхностный ток, рёберная волна.

Abstract. All maximums of spatial distribution of metal triangle's bistatic radar cross section are structured into sequences of diffraction cones, each of them having one edge of triangle as an axis. The major cone of the sequence has the highest RCS level, and its cone-satellites' RCS level reduces in succession. For the cone's sequences, resulted from primary diffraction by the triangle's edges, the major cones are the cones of diffracted rays. Maximums of bistatic RCS are observed in direction of the ray, reflected from the triangle, and in shadow direction, - both directions simultaneously belong to all three cones of diffracted rays around the edges of triangle. The scattered field on the cone of diffracted rays is formed as a sum of cophasal contributions from the edge elements. Subsequent cones-satellites are formed as sums of contributions from the edge elements, divided into 3, 5, 7 and so forth Fresnel zones. Surface currents, generated in primary diffraction by the triangle's edges, run toward the other edges and also form additional sequences of diffraction cones. Besides, sequences of diffraction cones, caused by the edge waves movement in opposite directions along the triangle's edges, are observed too. Main effects of secondary diffraction result exactly from the surface currents and the edge waves running onto, correspondingly, the edges and the vertices of triangle.

Key words: bistatic radar cross section, diffraction cones, Fresnel zones, primary and secondary diffraction, surface current, edge wave.

1. Постановка задачи

В данной работе, опираясь на результаты численных экспериментов, прослеживаются закономерности пространственного распределения интенсивности рассеяния металлическим треугольником, имеющим большие размеры по сравнению с длиной волны, при облучении треугольника плоской

электромагнитной волной (ЭМВ) с некоторого направления. Количественно интенсивность рассеяния характеризуется двухпозиционной эффективной поверхностью рассеяния (ДПЭПР). Базовое представление о рассеянии треугольником справедливо основывается на лучевой картине рассеяния [1,2]: пространственное распределение двухпозиционной ЭПР (ПР ДПЭПР) имеет зеркальный лепесток в направлении отражения луча, теневой лепесток в продолженном за объект направлении падения волны и три конуса дифракционных лучей, осями которых являются рёбра треугольника. В данной работе картина двухпозиционного рассеяния треугольником прослеживается более детально, с анализом причин формирования меньших по порядку величины максимумов ПР ДПЭПР, в частности – рассмотрены основные причины и проявления вторичной дифракции. Проявления вторичной дифракции выходят на первый план в тех угловых областях, по отношению к которым приняты меры для вывода основных максимумов ПР ДПЭПР из этих областей, например - выбором геометрии рассеивателя.

Заметим, что металлический треугольник является одним из основных простых рассеивателей, закономерности двухпозиционного рассеяния которыми представляют методический интерес. В этом же ряду находится металлический стержень, рассеяние которым изучено в [3].

2. Условия проведения расчётов

Металлический треугольник больших электрических размеров, ПР ДПЭПР которого приведены на рис. 1 и 2, был задан следующим образом. Основание треугольника (ребро P1 на рис. 1а) равно $15 \cdot \lambda_0$, где $\lambda_0 = 30\text{мм}$ - длина волны, и ориентировано вдоль оси Y , углы между основанием треугольника и боковыми рёбрами P2 и P3 составляют, соответственно, 60° и 50° (рис. 1а), так что длины сторон составляют, приблизительно 12 и 14 длин волн. Нормаль к треугольнику отклонена от горизонтали вверх на угол 20° .

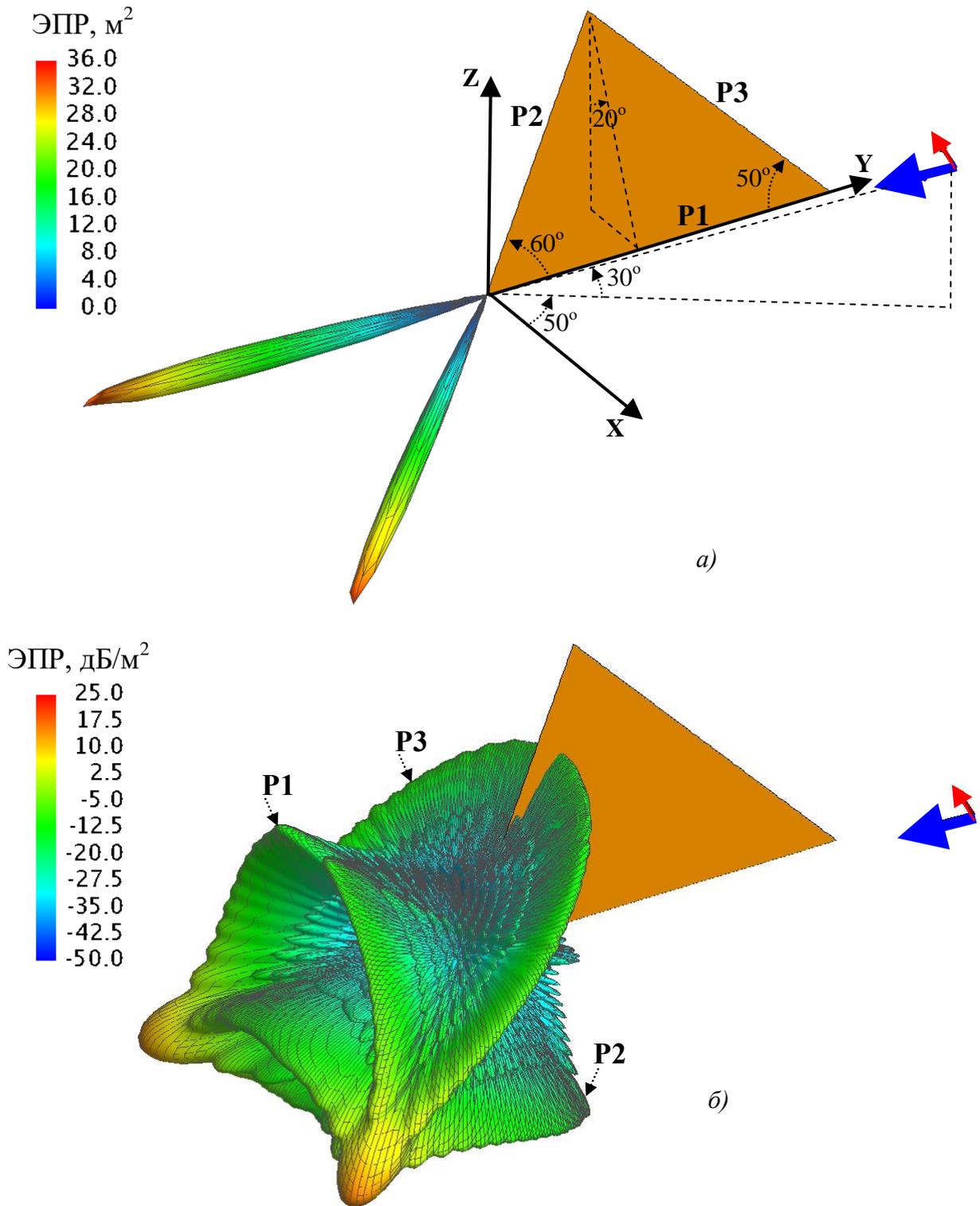


Рис. 1. Пространственное распределение двухпозиционной ЭПР металлического треугольника в сферической системе координат. ЭПР представлено *a)* в линейном (м^2) и *б)* в логарифмическом (дБ/м^2) масштабах. θ -овая поляризация падающей волны

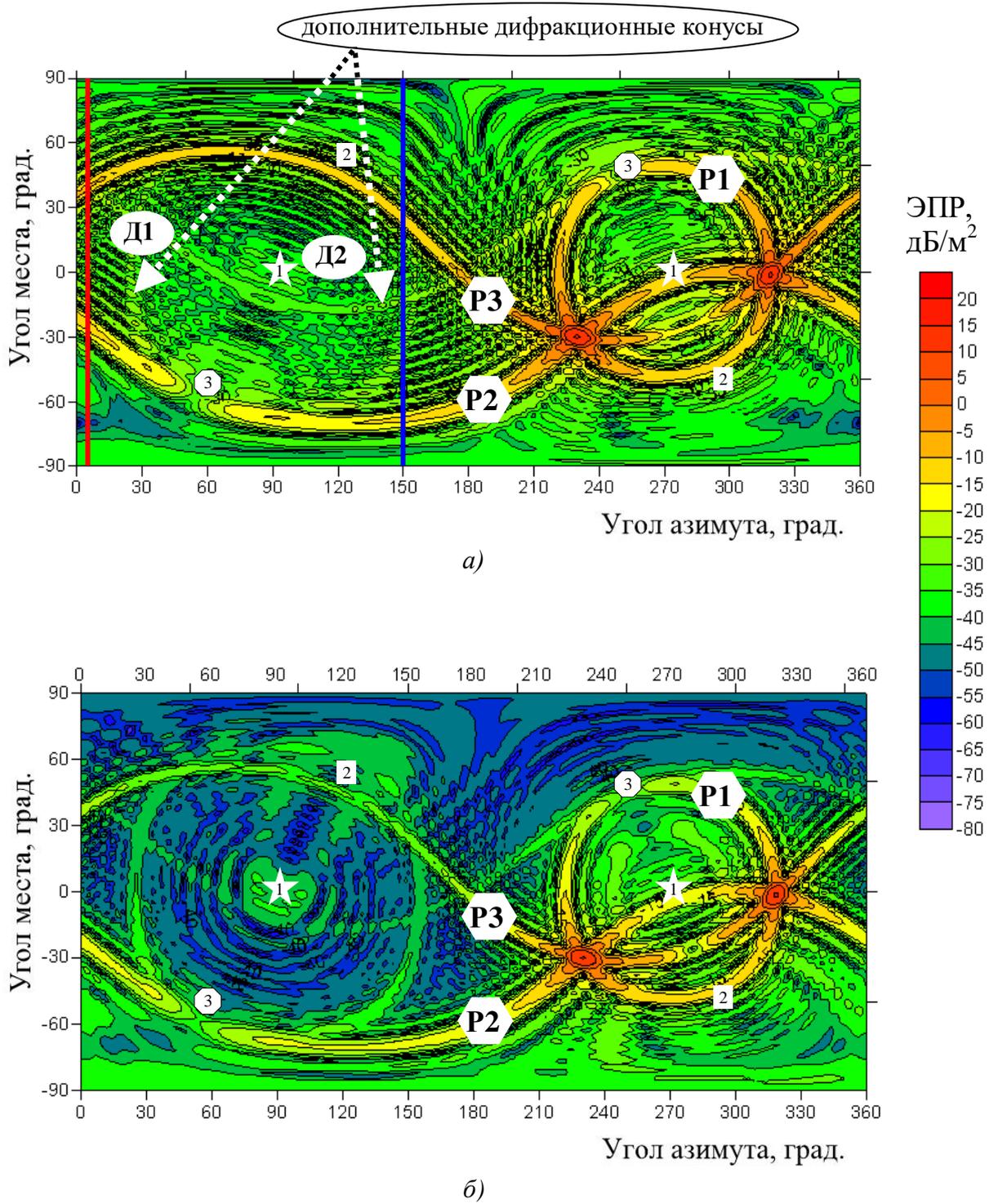


Рис. 2. Пространственное распределение двухпозиционной ЭПР металлического треугольника в виде линий уровня в системе координат угол азимута, угол места. Поляризация падающей волны а) θ -овая, б) φ -овая

Все направления далее будут характеризоваться углом азимута (УА), отсчитываемым в горизонтальной плоскости ХУ от оси Х, и углом места (УМ), отсчитываемым от горизонтальной плоскости и дополнительным к углу зенита. Направление падения плоской ЭМВ на треугольник было задано как $\{УА=50^\circ, УМ=30^\circ\}$. Расчёты ПР ДПЭПР были выполнены с помощью электродинамической САПР FEKO, используемой по лицензии.

3. Пространственное распределение двухпозиционной ЭПР треугольника как множество дифракционных конусов

Вид ПР ДПЭПР треугольника представлен на рис. 1 – в сферической системе координат, на рис. 2 – на карте линий уровня ДПЭПР в координатах углов азимута и места $\{УА, УМ\}$. Пространственное распределение на рис. 1а представлено при линейном масштабе для ЭПР, на рис. 1б – при логарифмическом, а на рис. 2 – только при логарифмическом. Картина распределения в сферической системе координат нагляднее, но количественно анализировать ПР ДПЭПР удобнее на карте $\{УА, УМ\}$, поскольку нет заслонения малых лепестков большими и можно определеннее судить об уровне двухпозиционной ЭПР и угловых координатах направлений. Уточним, что ПР ДПЭПР треугольника на рис. 1 и 2а соответствует θ -вой поляризации падающей волны ($E_\theta^{\text{пад}} \neq 0, E_\varphi^{\text{пад}} = 0$), на рис. 2б – φ -вой поляризации ($E_\theta^{\text{пад}} = 0, E_\varphi^{\text{пад}} \neq 0$). При этом на рис. 1, 2 приведено распределение полной ЭПР (и далее на рис. 5 – полного поля), определяемой с учётом наличия и θ , и φ составляющих у рассеянного поля.

Из рис. 1б, 2 видно, что всё двухпозиционное рассеяние треугольника структурировано в дифракционные конусы, имеющие в качестве оси одно из рёбер треугольника. Более того, из рисунков следует, что группы соосных дифракционных конусов образуют семейства конусов с углами раскрытия, мало меняющимися от конуса к конусу. Каждое семейство состоит из основного конуса с наибольшими значениями ДПЭПР, и его конусов-сателлитов с последовательно уменьшающимися значениями ДПЭПР. Заметим, что в

координатах $\{УА, УМ\}$ дифракционный конус представляется замкнутой кривой, если он не охватывает направлений точно вверх, или точно вниз ($УМ=90^\circ$, или $УМ=-90^\circ$), либо отображается в виде кривой, переходящей саму в себя с периодом 360° по углу азимута, если дифракционный конус охватывает одно из направлений точно вверх или вниз. При этом чем меньше по абсолютной величине верхний предел по углу места для направлений, принадлежащих конусу, тем ближе к окружности кривая, отображающая конус в координатах $\{УА, УМ\}$.

Образование максимумов ДПЭПР в теновом и зеркальном направлениях, а также трёх келлеровских конусов дифракционных лучей и семейств дифракционных конусов-сателлитов вокруг них является результатом первичной дифракции. На рис. 1б, 2а,б конусы дифракционных лучей помечены как Р1, Р2, Р3, в соответствии с тем, какое ребро является осью конуса.

Упорядоченную картину хода конусов, возникших при первичной дифракции, нарушают дополнительные дифракционные конусы, возникающие в результате вторичной дифракции. Так, конусы Д1 и Д2, которые видны на рис. 2, формируются в результате вторичной дифракции поверхностных токов на краях треугольника. Как следует из рис. 2, конусы Д1 и Д2 имеют конусы-сателлиты, и, следовательно, являются основными в составе соответствующих семейств, хотя уровень ДПЭПР на конусах этих семейств существенно ниже, чем на конусах семейств, возникших в результате первичной дифракции. Наблюдаются и семейства дифракционных конусов с относительно малой ДПЭПР, возникновение которых объясняется вторичной дифракцией рёберных волн, бегущих вдоль краёв треугольника, на вершинах треугольника. Более подробно проявления эффектов вторичной дифракции обсуждаются в разделе 5 ниже.

Принадлежность тенового направления всем трём конусам дифракционных лучей очевидна: направления падения и теновое совпадают. В принятых условиях теновое направление характеризуется координатами $УА=230^\circ$ и

$УМ = -30^\circ$. Принадлежность отражённого луча всем трём конусам дифракционных лучей легко доказать. Пусть $\vec{1}_{inc}$, $\vec{1}_R$ и $\vec{1}_N$ – единичные векторы в направлении облучения, в направлении отражения луча от поверхности треугольника и в направлении нормали к поверхности треугольника. Тогда

$$\vec{1}_R = \vec{1}_{inc} - 2 \cdot \vec{1}_N \cdot (\vec{1}_N, \vec{1}_{inc}). \quad (1)$$

Пусть $\vec{1}_e$ – единичный вектор в направлении ребра. Получим

$$(\vec{1}_R, \vec{1}_e) = (\vec{1}_{inc}, \vec{1}_e) - 2 \cdot (\vec{1}_N, \vec{1}_e) \cdot (\vec{1}_N, \vec{1}_{inc}) = (\vec{1}_{inc}, \vec{1}_e),$$

так как $\vec{1}_N \perp \vec{1}_e$. Отсюда направление отражения луча действительно образует те же углы со сторонами треугольника, что и направление облучения, и, следовательно, принадлежит всем трём конусам дифракционных лучей. Вычисления по формуле (1) показывают, что направление отражения луча в условиях расчёта имеет угловые координаты $\{УА \approx 318^\circ, УМ \approx -1^\circ\}$, что и наблюдается на рис. 2.

Образование любого дифракционного конуса при первичной дифракции – как конуса дифракционных лучей, так и соосных ему конусов-сателлитов, – результат многоуровневой интерференции. Действительно, разделим край треугольника на дискретности и выделим на поверхности треугольника полосы с основаниями в виде дискретов, при ориентации полос вдоль дифракционных лучей, начинающихся на ребре и касательных к поверхности (рис. 3), как в [2] при определении поля элементарной краевой волны. Тогда фактически излучать будут прирёберные участки полос, а вклады последующих участков на полосе усреднятся и с некоторой степенью плавности сведутся к нулю при наклонном обрезании полосы другим ребром треугольника. Далее вклады прирёберных участков полос в поле рассеяния в дальней зоне складываются с учётом разности фаз и образуют поле дифракционного конуса, либо провал между конусами.

Если на конусе вокруг некоторого ребра поля всех прирёберных участков складываются в фазе, то такой конус представляет собой основной (конус дифракционных лучей) в семействе дифракционных конусов и имеет угол полуоткрытия, равный углу между направлением падения и ребром. Если же при последовательном изменении угла полуоткрытия конуса оказывается, что при формировании рассеянного поля для всех направлений, принадлежащих конусу, ребро разделено на 3, 5, 7 и так далее зон Френеля, то такой конус представляет собой дифракционный конус-спутник. Для конусов-спутников характерно быстрое уменьшение уровня ДПЭПР с увеличением числа зон Френеля вдоль ребра.

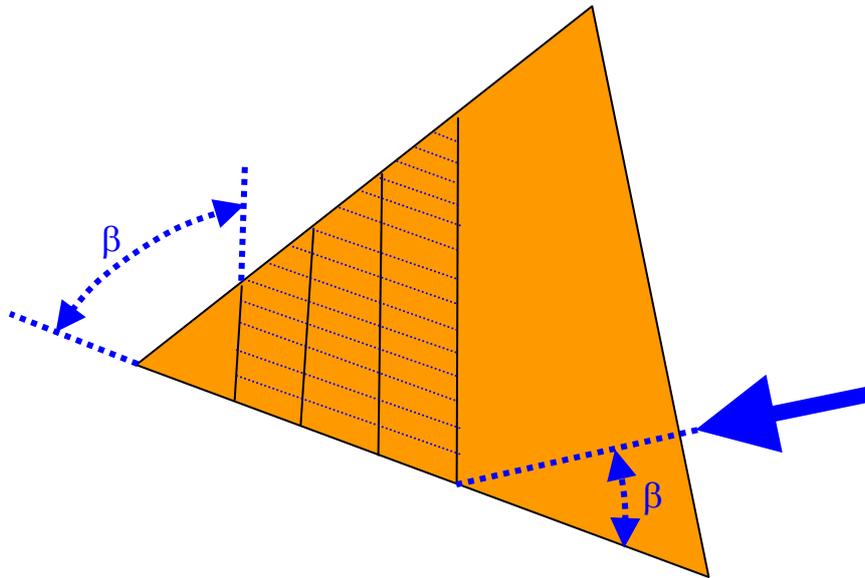


Рис. 3. К объяснению формирования дифракционных конусов как результата многоуровневой интерференции: выделение полос в направлении дифракционных лучей на поверхности треугольника

Получим количественную оценку убывания рассеянного поля при переходе от конуса дифракционных лучей к его конусам-спутникам в плоскости постоянного азимута в локальной сферической системе координат, связанной с ребром треугольника. В этой системе координат ось Z направлена вдоль ребра, а угол зенита отсчитывается от направления ориентации ребра. Векторному сложению синфазных вкладов прирёберных участков в поле рассеяния в направлении, принадлежащем конусу дифракционных лучей,

соответствует прямая 1 на рис. 4. Поскольку для первого конуса-сателлита, ближайшего к конусу дифракционных лучей, вдоль ребра укладывается три зоны Френеля, то кривая 2 на рис. 4, описывающая векторное сложение вкладов прирёберных участков в этом случае, состоит из трёх полуокружностей. Пусть R - радиус полуокружности, формирующейся в результате векторного сложения вкладов прирёберных участков в пределах одной зоны Френеля. Результирующее поле рассеяния ребром получается как вектор из начала в конец кривой 2. Отсюда, исходя из равенства длин кривых 1 и 2, получим соотношение между полями рассеяния в направлениях, принадлежащих конусу дифракционных лучей и первому конусу-сателлиту:

$$\frac{3\pi R}{2R} \approx 4.7.$$

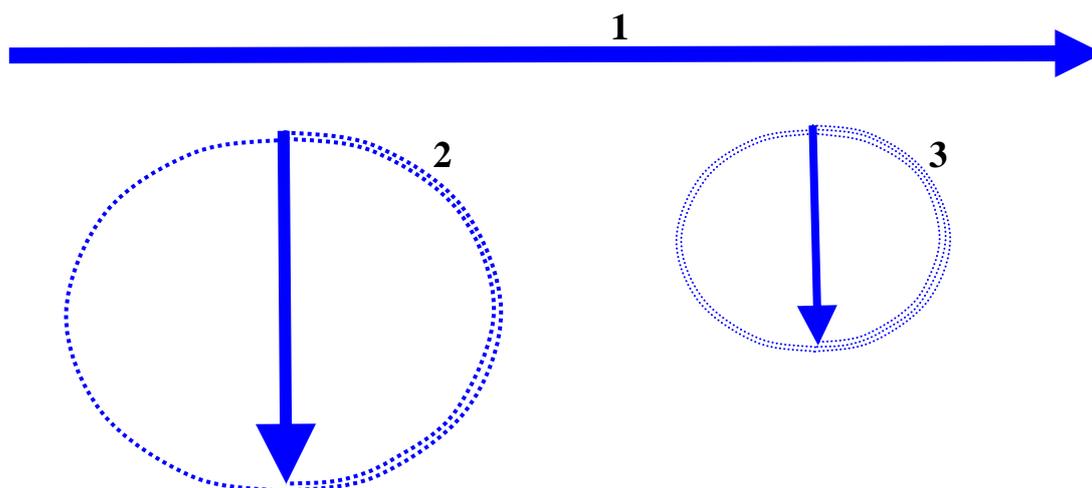


Рис. 4. К объяснению соотношения амплитуд рассеянного поля на конусе дифракционных лучей (синфазное суммирование вкладов прирёберных участков) и на его ближайших дифракционных конусах-сателлитах (три, пять, семь и так далее зон Френеля вдоль ребра)

Кривая 3 на рис. 4 состоит из пяти полуокружностей и соответствует формированию рассеянного поля на втором конусе-сателлите. Для направлений рассеяния, принадлежащих этому конусу, вдоль ребра укладывается пять зон Френеля. Поэтому соотношение между рассеянными полями на конусе дифракционных лучей и на втором конусе-сателлите составляет

$$\frac{5\pi R}{2R} \approx 7.9.$$

Из аналогичных соображений поле на конусе дифракционных лучей должно превышать поле на третьем конусе-сателлите в

$$\frac{7\pi R}{2R} \approx 11 \text{ раз.}$$

Таким образом, соотношения между основным и боковыми максимумами те же, что и для известной функции $\sin(x)/x$, описывающей интерференционные явления в случаях, когда с вариацией угла наблюдения можно пренебречь изменением амплитуды и ориентации в пространстве для интерферирующих вкладов, а учитывать лишь изменение разности фаз между отдельными вкладами.

На рис. 5 приведены зависимости модуля амплитуды поля E' , рассеянного металлическим треугольником, в интервалах $UM = [-90^\circ, 90^\circ]$ при углах азимута $UA = 5^\circ$ (красная сплошная кривая) и $UA = 150^\circ$ (синяя пунктирная кривая) при облучении треугольника θ -поляризованной волной. Здесь принято, что рассеянное поле как функция радиальной координаты r имеет вид $E_{\text{расс}} = E' \cdot \exp(-ik_0 r) / r$. Сечения пространственного распределения двухпозиционной ЭПР треугольника, соответствующие зависимостям на рис. 5, показаны на рис. 2а красной и синей линиями. Как следует из вида ПР ДПЭПР на рис. 2, интерференция между полями дифракционных конусов разных семейств имеет место практически во всех направлениях, хотя и выражена в разной степени. Интерференция проявляется в пересечении дифракционных конусов, принадлежащих разным семействам (и, соответственно, центрированных около разных рёбер), и, как следствие, в волнообразном изменении ДПЭПР по каждому дифракционному конусу.

Отметим, что при θ -овой поляризации падающей волны доминирование дифракционных конусов одного семейства и, следовательно, относительно слабая интерференция полей различных семейств дифракционных конусов наблюдается для $UA = 5^\circ$ при $UM \geq 40^\circ$ и для $UA = 150^\circ$ при $UM \geq 25^\circ$, как это

следует из рис. 2а. На этих участках двухпозиционное рассеяние треугольником преимущественно определяется полями дифракционных конусов вокруг ребра РЗ. Проверка показывает, что именно на этих участках графиков снижение амплитуды боковых первого, второго и третьего максимумов, по сравнению с основным, хорошо соответствует приведённым выше оценкам (смотри рис. 5).

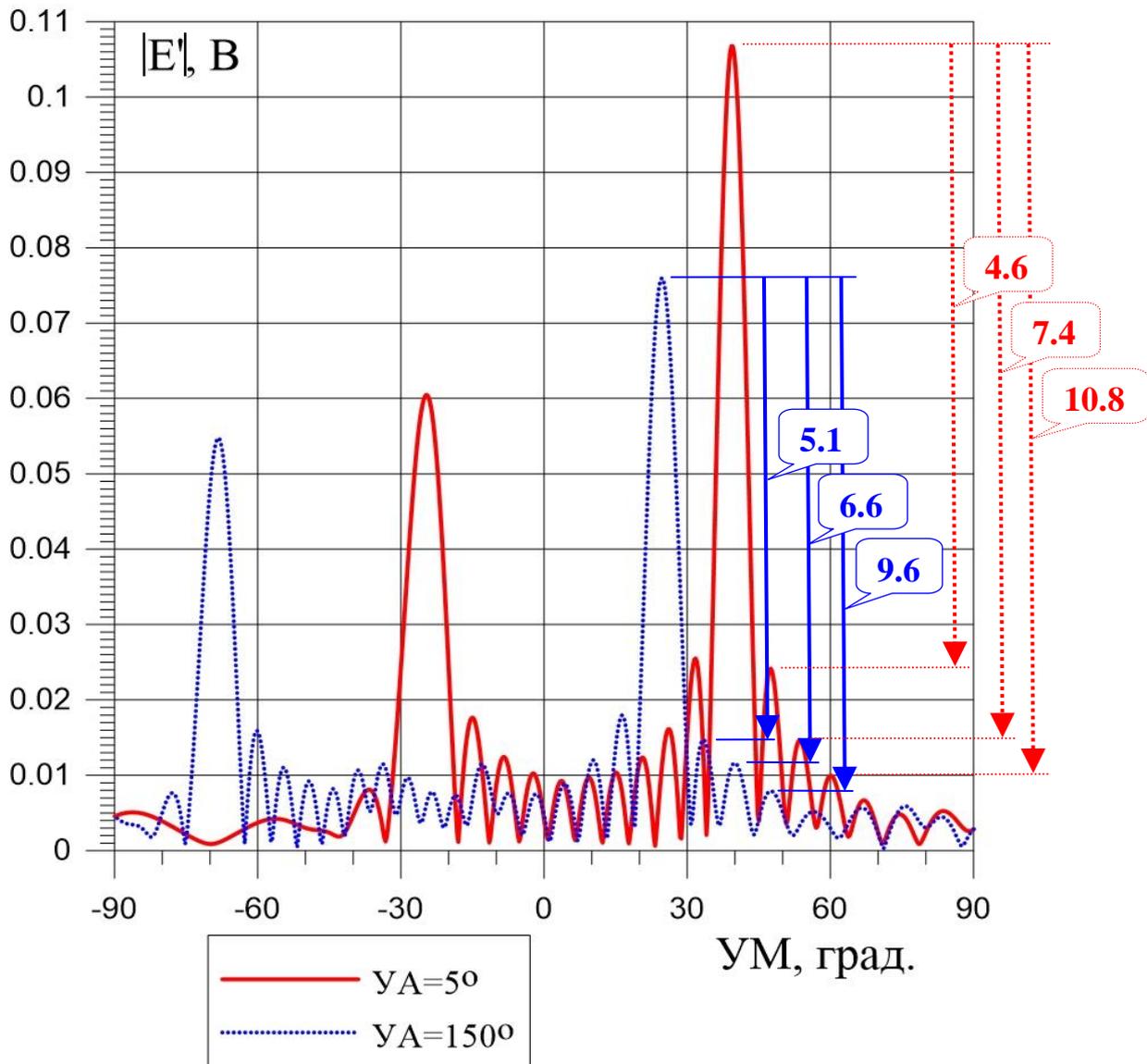


Рис. 5. Угломестные зависимости модуля амплитуды поля, рассеянного металлическим треугольником, при углах азимута $\text{УА} = 5^\circ$ и $\text{УА} = 150^\circ$.
 θ -овая поляризация падающей волны

Зависимости, представленные на рис. 5, соответствуют косым пространственным сечениям семейств дифракционных конусов, в частности - семейства дифракционных конусов вокруг ребра РЗ. Действительно, сечения ПР ДПЭПР треугольника на рис. 2а проходят не по нормали, а наклонно к кривым, соответствующим дифракционным конусам семейства. Поэтому из хорошего соответствия полученной в расчётах скорости убывания максимумов рассеянного поля на дифракционных конусах-сателлитах оценкам, приведённым выше, следует одновременно медленность изменения рассеянного поля по дифракционным конусам. Вместе с тем зависимость рассеянного поля от угла места УМ при $УА=150^\circ$ явно соответствует более наклонному сечению семейства дифракционных конусов около ребра РЗ, по сравнению с его радиальным сечением, чем зависимость при $УА=5^\circ$. Это, видимо, и объясняет тот факт, что в случае $УА=5^\circ$ соотношения между основным и боковыми максимумами рассеянного поля существенно более точно соответствуют приведённым ранее оценкам.

4. Классификация максимумов пространственного распределения двухпозиционной ЭПР треугольника по порядку величины

Максимумы ДПЭПР первого порядка наблюдаются в теневом и зеркальном направлениях. Келлеровские конусы дифракционных лучей можно классифицировать как максимумы ПР ДПЭПР второго порядка.

Ориентировочно можно утверждать, что конусы-сателлиты младших порядков в семействах конусов, созданных при первичной дифракции, и основные конусы в семействах дифракционных конусов, формирующихся при вторичной дифракции, образуют группу максимумов ПР ДПЭПР третьего порядка.

5. Дифракционные конусы, формирующиеся при вторичной дифракции поверхностных токов и рёберных волн

Результаты расчётов ПР ДПЭПР, представленные на рис. 1 и 2, указывают

на наличие только двух механизмов вторичной дифракции, приводящих к появлению существенных дополнительных дифракционных конусов для металлического треугольника. Первый механизм – это набегание поверхностных токов, возникших при первичной дифракции падающей ЭМВ на краю треугольника, на другой край и последующая вторичная дифракция тока на этом краю. Вторым механизмом – это набегание рёберной волны, возникающей при первичной дифракции падающей волны на вершине ребра, на другую вершину ребра, и последующая вторичная дифракция.

Рис. 6 иллюстрирует механизм образования дополнительных дифракционных конусов из-за вторичной дифракции поверхностных токов. Волна падает на ребро P1 под углом $\alpha_1 \approx 48^\circ$, далее в результате первичной дифракции от ребра отходит поверхностный ток под углом также α_1 в направлении касательного к поверхности дифракционного луча. Этот поверхностный ток подходит к ребру P2 под углом $\alpha_2 \approx 72^\circ$. В результате вторичной дифракции образуется конус, центрированный около ребра P2, имеющий тот же угол полураскрыва α_2 и ориентированный преимущественно вверх. Детальная проверка с использованием геометрической САПР показала, что это дополнительный конус Д2 на рис. 2. Падающая волна подходит к ребру P2 под углом $\beta_1 \approx 55^\circ$, так что поверхностный ток отходит от ребра под тем же углом β_1 и пересекает ребро P1 под углом $\beta_2 \approx 65^\circ$. В результате вторичной дифракции возникает дополнительный конус, ось которого ориентирована по ребру P1 в направлении $\{УА=90^\circ, УМ=0^\circ\}$, а угол полураскрыва также равен β_2 . На рис. 2 это дополнительный дифракционный конус Д1. Наконец, поверхностный ток, формирующийся при первичной дифракции падающей волны на ребре P3, затем приблизительно в равных долях делится между рёбрами P1 и P2, что делает относительно малозаметными дополнительные дифракционные конусы, возникающие при последующей вторичной дифракции.

Сравнение верхнего и нижнего ПР ДПЭПР на рис. 2 показывает, что траектория хода как дополнительных, так и вообще всех дифракционных конусов на карте линий уровня в координатах $\{УА, УМ\}$ не зависит от поляризации.

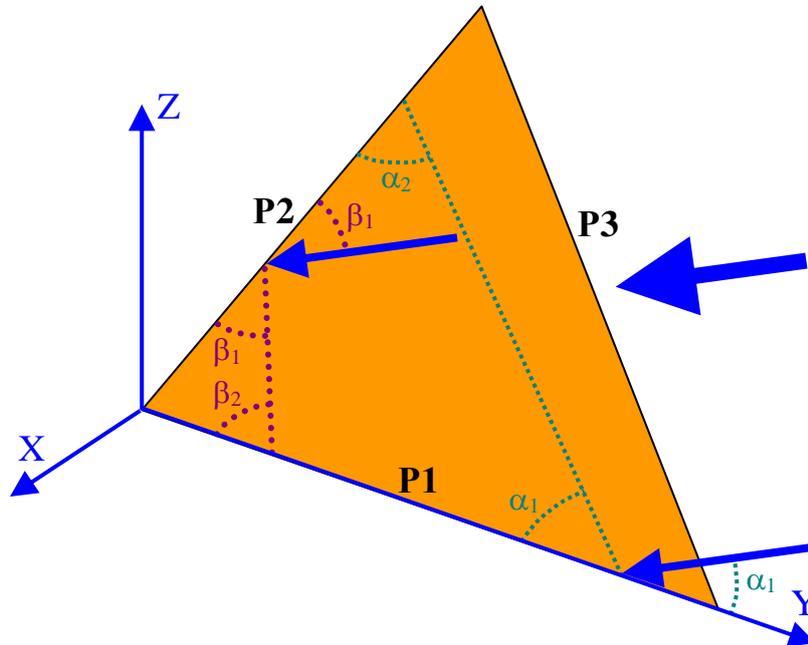


Рис. 6. Формирование дополнительных дифракционных конусов из-за вторичной дифракции поверхностных токов

Встречное распространение рёберных волн вдоль кромок треугольника приводит к появлению семейств дифракционных конусов, основной конус которых недалеко, как следует из рис. 2 - ориентировочно на угол 20° отстоит от тех двух направлений, в которых ориентировано ребро. На верхнем и нижнем распределениях на рис. 2 звёздочками помечены направления ориентации ребра P1, квадратами – ребра P2, кружками – ребра P3. Видно, что вокруг этих направлений действительно существуют семейства дифракционных конусов, которые аналогичны изученным ранее дифракционным конусам, создаваемым рёберными волнами, бегущими вдоль металлического стержня [3]. Проверка показывает, что угловое положение дифракционных конусов, создаваемых рёберными волнами, не зависит не только от поляризации падающей волны, но и от направления падения ЭМВ.

Для подавления вкладов в рассеяние металлической пластиной от эффектов вторичной дифракции необходимо, таким образом, подавить

поверхностные токи и рёберные волны. Принципиальная возможность этого показана в [4, 5].

6. Заключение

1. При рассеянии электромагнитной волны металлическим треугольником больших, по сравнению с длиной волны, размеров все максимумы пространственного распределения двухпозиционной ЭПР группируются в семейства дифракционных конусов, причём осью для всех конусов любого семейства является одно из рёбер треугольника.

2. Часть конусов повышенного двухпозиционного ЭПР формируется в результате первичной дифракции, часть – как результат вторичной дифракции. Два основных механизма вторичной дифракции – набегание поверхностных токов и рёберных волн, возникающих при первичной дифракции, на, соответственно, края и вершины треугольника.

Литература

1. Keller J.B. Geometrical theory of diffraction. *Journal of the Optical Society of America*. 1962, Vol. 52. No. 2, P.116-130.
2. Уфимцев П.Я. Основы физической теории дифракции. М: Бином, 2009. 352 с.
3. Елизаров С.В., Краснолобов И.И., Лебедев А.М., Семенов В.Н., Федоренко А.И., Фурманова Т.А. Минимизация вклада в обратное рассеяние от поверхностных волн на тонком металлическом стержне путём нанесения радиопоглощающего покрытия на один из концов стержня // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» («ИРЭМВ-2013») – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013г., с.329-333.
4. Лебедев А.М., Фурманова Т.А. Ловушки для поверхностных токов // Доклады 2-й Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, 26-28 ноября 2014 г., с.497–500.

5. Лебедев А.М., Фурманова Т.А. Уменьшение дифракционного шума металлической пластины путём подавления волн, распространяющихся вдоль её краёв // Доклады 4-й Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Москва, 23-25 ноября 2016 г., с.442–447.

Для цитирования:

Лебедев А.М., Обухов М.Л., Селин И.А., Фурманова Т.А. Закономерности двухпозиционного рассеяния металлическим треугольником. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/15/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.15