

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ УКРЫТИЙ С РЕБРОМ

К. М. Басков

Федеральное государственное учреждение науки Институт теоретической и  
прикладной электродинамики Российской академии наук (ИТПЭ РАН)

Статья поступила в редакцию 4 декабря 2015 г.

**Аннотация.** В статье приводятся результаты численных исследований радиотехнических свойств радиопрозрачных укрытий антенны, имеющих ребро. Показано, что из-за преломления волны при прохождении стенок таких укрытий во фронте волны образуется “тёмная” зона. Это приводит к существенному поднятию уровня боковых лепестков диаграммы направленности антенны в плоскости, перпендикулярной ребру. В статье предложены несколько способов устранения этого негативного эффекта, самым подходящим из которых является скругление ребра. Кроме этого показано, что рёбра или нерадиопрозрачные элементы укрытия, изготовленные из метаматериала с эффективной диэлектрической проницаемостью близкой к единице, обладают низким уровнем рассеянного поля в направлении теневого лепестка их диаграммы рассеяния. Это также позволяет снизить их негативное влияние на характеристики антенны. Результаты исследований, представленные в статье, были доложены на международной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (ИРЭМВ-2015).

**Ключевые слова:** радиопрозрачное укрытие (Radome), ребро (Edge), диэлектрик (dielectric), диаграмма направленности (radiation pattern), диэлектрическая проницаемость (permittivity), метаматериал (metamaterial).

**Abstract.** The electromagnetic properties of antenna radomes with an edge are researched. It is shown that "dark" area in wave front is formed because of the wave refraction while passing the radome's wall. It leads to a considerable rising of the side lobe levels of the antenna pattern in the edge-perpendicular plane. The correction procedures of this negative effect are suggested. It shows that the edge or other

opaque elements of Radom made of a metamaterial with effective permittivity close to unity, have low level field in the direction of the shadow scattering. The research results presented in this article have been reported at the International Conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves" (RSEMW 2015).

**Keywords:** radome, edge, dielectric, radiation pattern, permittivity, metamaterial.

## Введение

Объекты, выполненные с применением «Стелс» технологий, обладают оребрѐнными формами, что позволяет снизить их радиолокационную заметность (рисунок 1). Оребрѐнная форма таких объектов приводит к необходимости использовать для защиты их радиолокационных систем радиопрозрачные укрытия (РПУ), также имеющие ребра. Наличие ребра у РПУ, как и любой другой неоднородности, приводит к искажению фронта электромагнитной волны. Исследование влияния ребра на радиотехническое качество РПУ является важной задачей для разработчиков радиолокационных систем.



а) F-117

Носовой обтекатель с ребром



б) F-22

Рисунок 1 – Самолѐты, выполненные по «стелс» технологиям

Исследованию дифракции электромагнитной волны на диэлектрическом клине было посвящено достаточно много работ, но точного решения этой задачи пока не найдено [1]. Поэтому исследования рассеяния на диэлектрических объектах – как на клине, так и на имеющих более сложную геометрию, - проводятся численно как методами в строгой постановке, так и методами, основанными на принципах физической оптики (ФО). В настоящей работе влияние ребра на радиотехническое качество РПУ также исследуется

численно – как в строгой постановке методом интегральных уравнений (ИУ) с использованием пакета программ электродинамического моделирования FEKO, так и с помощью методики расчёта радиотехнических характеристик системы антенна – РПУ [2], которая основана на принципах ФО. В последней методике учитывается преломление волны при прохождении стенки. Хотя, казалось бы, РПУ, которое далее рассматривается, имеет слишком маленькие размеры и толстую стенку, чтобы описывать её электродинамические свойства в приближении ФО, однако оказывается, что методика [2] позволяет исследовать основные процессы прохождения электромагнитной волны через диэлектрическую стенку РПУ вблизи ребра.

### **1. Влияние ребра радиопрозрачного укрытия на диаграмму направленности антенны**

Для численного исследования была выбрана модельная система антенна - РПУ, представленная на рисунке 2. Расчёты проводились на частоте 5 ГГц для случая поляризации электрического поля перпендикулярно ребру (в этом случае минимизируется влияние стенки РПУ на характеристики антенны). Антенна моделировалась круглой апертурой диаметром  $D_A = 0,32$  мм со следующим амплитудным распределением эквивалентных электрического и магнитного токов по апертуре:

$$I_A, M_A = \frac{\left(1 + 0,4 \cos \pi \frac{2x}{D_A}\right) \left(1 + 0,4 \cos \pi \frac{2y}{D_A}\right)}{(1 + 0,4)^2} \quad (1)$$

В качестве РПУ был выбран диэлектрический уголок с толщиной стенки  $l_C = 15$  мм. Значения диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 4, 16, 36$  и  $64$ ) выбирались такими, чтобы электрическая толщина стенки была кратна половине длины волны. С помощью пакета программ FEKO методом ИУ и в приближении физической оптики с помощью методики, описанной в [2], были рассчитаны диаграммы направленности (ДН) антенны в присутствии такого

РПУ в плоскости  $E$  перпендикулярной ребру (рисунок 3). Можно заметить, что поднятие уровня боковых лепестков происходит в этой плоскости во всём секторе углов. Кроме этого, хорошо совпадают уровни, до которых поднимаются боковые лепестки ДН, рассчитанных методом ИУ и в приближении ФО. Этот факт говорит о том, что основное влияние ребра на ухудшение радиотехнического качества РПУ связано в первую очередь с физико-оптическими процессами прохождения электромагнитной волной стенки вблизи ребра.

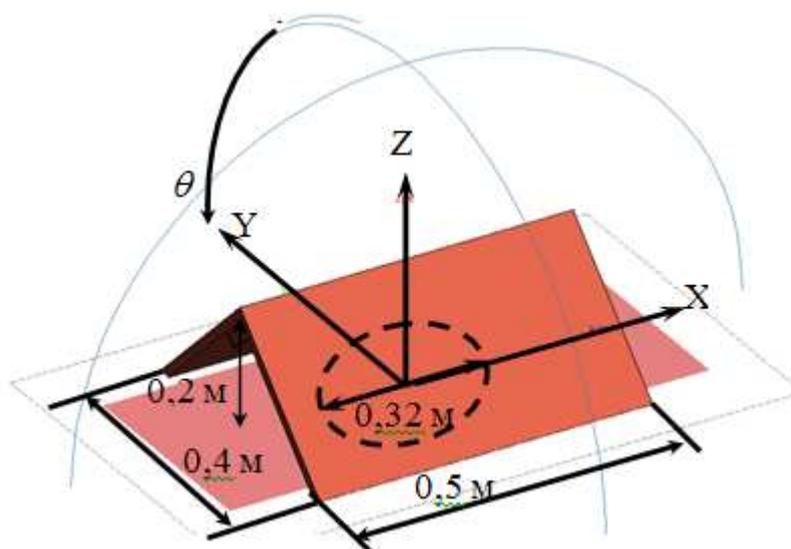


Рисунок 2 – Система “антенна – РПУ”

На рисунке 4 приведены распределение токов по линейным эквивалентным апертурам, рассчитанным по ДН (рисунки 2 а, в и г) с помощью методики описанной в [3]. Распределение токов рассчитывалось вдоль оси  $Y$  при  $z = 0,2$  м (сразу за ребром РПУ). Можно заметить, что искажения в ДН, связанные с наличием ребра у РПУ, соответствуют существенному “провалу” в распределении тока по эквивалентной апертуре. Для  $\epsilon = 4$  “провал” меньше. Распределения токов по эквивалентной апертуре для случая  $\epsilon = 36$  и  $64$  практически совпадают.

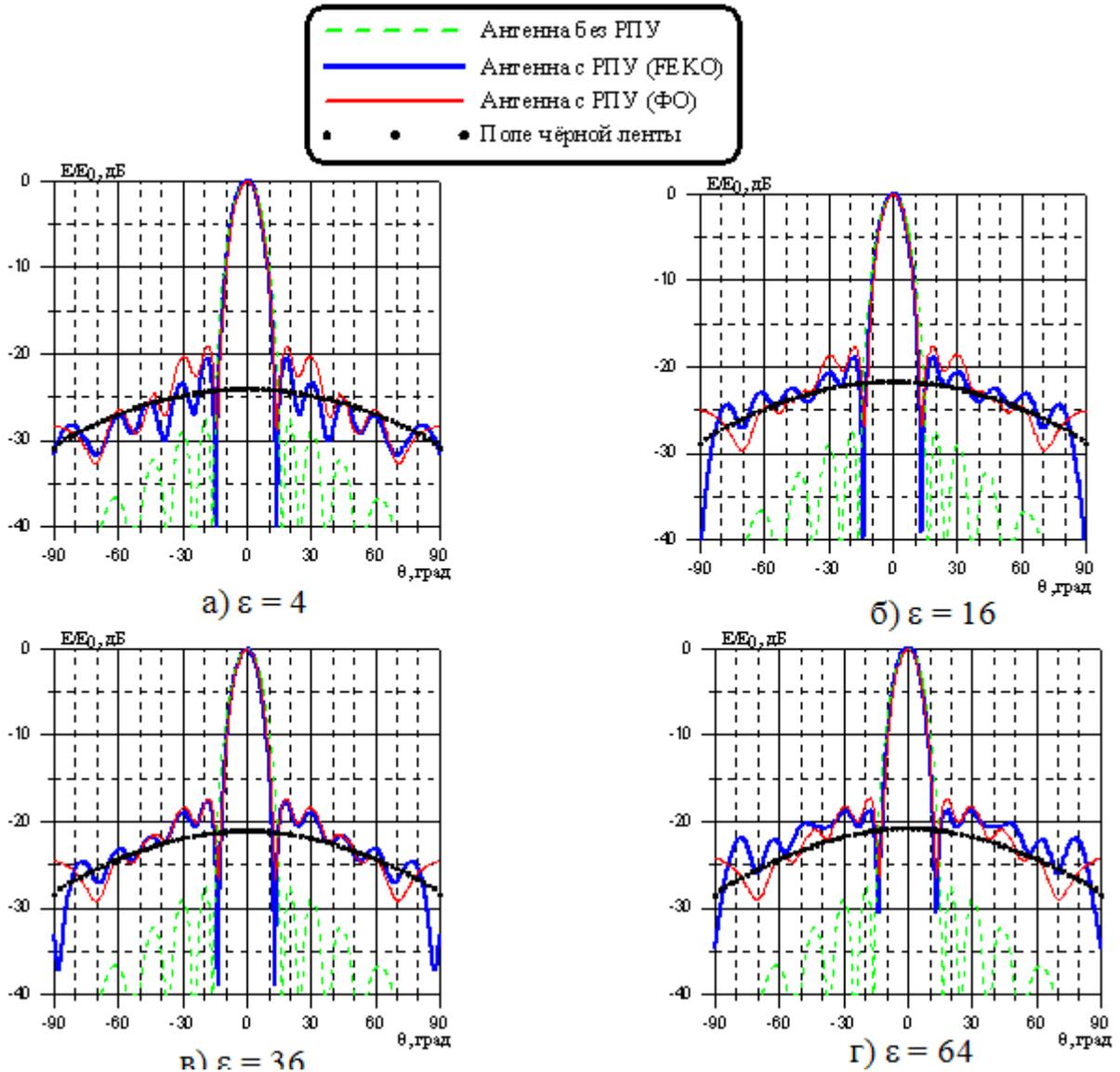


Рисунок 3 - Диаграмма направленности системы “антенна - РПУ” с разной диэлектрической проницаемостью стенки

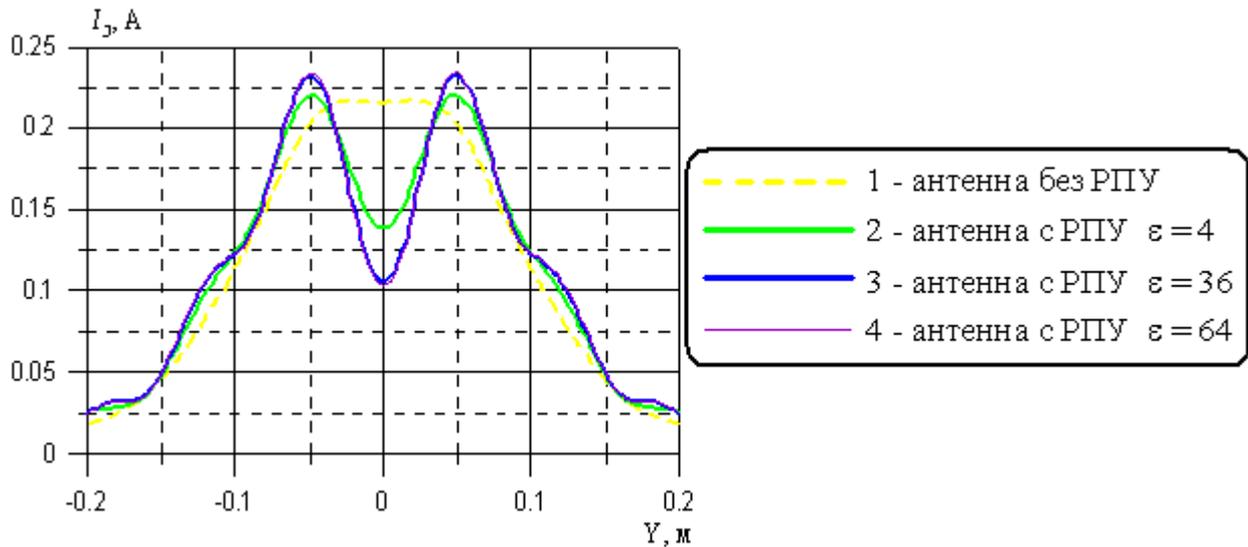


Рисунок 4 – Распределение токов по эквивалентным линейным апертурам антенны с РПУ с ребром на дистанции от антенны  $Z=0,2$  м (сразу за ребром)

Из анализа полученных результатов расчёта следует вывод, что наличие ребра у РПУ приводит к образованию “тёмной” зоны у фронта волны, которая становится более выраженной при увеличении диэлектрической проницаемости стенки. Эта “тёмная” зона образуется в результате преломления волны при прохождении стенки РПУ вблизи ребра (рисунок 5). Из геометрических соображений ширину  $S$  “тёмной” зоны можно рассчитать по формуле:

$$S = \frac{2l_c}{\cos \theta_{II}} \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta_{II} - \frac{\varphi_P}{2} \right), \quad (2)$$

где  $\theta_{II}$  – угол преломления волны,  $\varphi_P$  – угол раскрыва ребра.

Кроме этого, из-за более сильного преломления волны с ростом диэлектрической проницаемости обтекателя эквивалентная апертура расширяется, что приводит к некоторому обужению и увеличению максимума главного лепестка ДН.

На рисунках 3 а-г кроме рассчитанных ДН приведены дифракционные поля абсолютно чёрной ленты [4] (“тёмной” зоны), находящейся перед антенной в том месте, где находится ребро РПУ (рисунок 2). Видно, что уровень, до которого поднимаются боковые лепестки ДН антенны с РПУ, очень близок к уровню рассеянного поля чёрной ленты. Чем больше отношение  $S_{max} / D_{AY}$  ( $S_{max}$  – максимально возможная ширина “тёмной” зоны при  $\varepsilon \rightarrow \infty$ ,  $D_{AY}$  – размер антенны вдоль координаты  $Y$ ), тем больше связанное с наличием ребра снижение радиотехнического качества РПУ. При сканировании или в случае, когда ребро облучается антенной под некоторым углом  $\varphi_C$ , боковые лепестки ДН с высоким уровнем будут образовывать конус с углом раскрыва равным  $2(90^\circ - \varphi_C)$  и осью, направленной вдоль ребра [5,6]. Вершина конуса направлена в сторону, противоположную направлению облучения (рисунок 6).

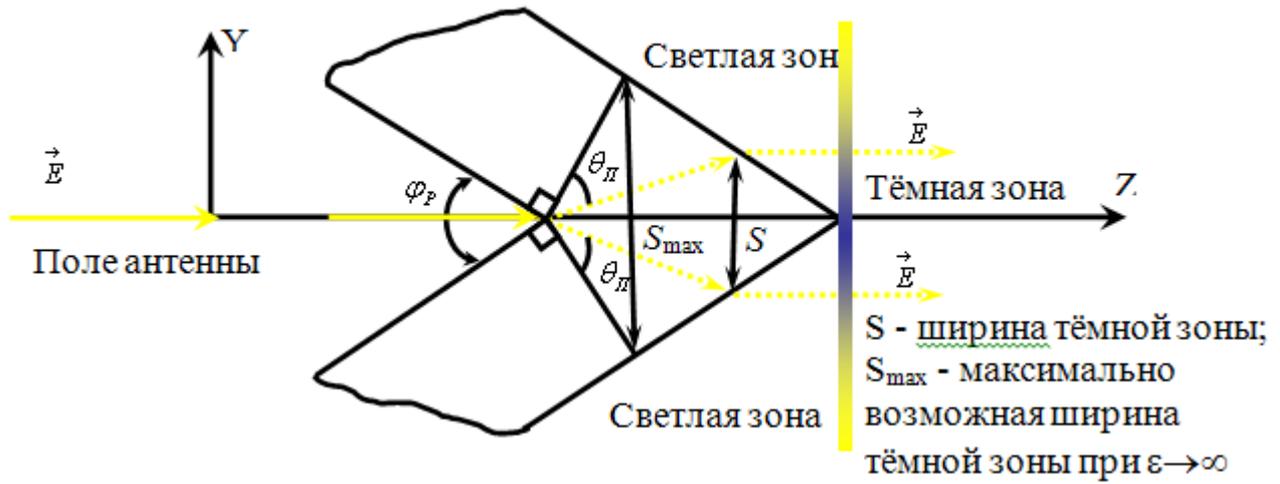


Рисунок 5 - Образование “тёмной” зоны во фронте волны из-за наличия ребра у РПУ

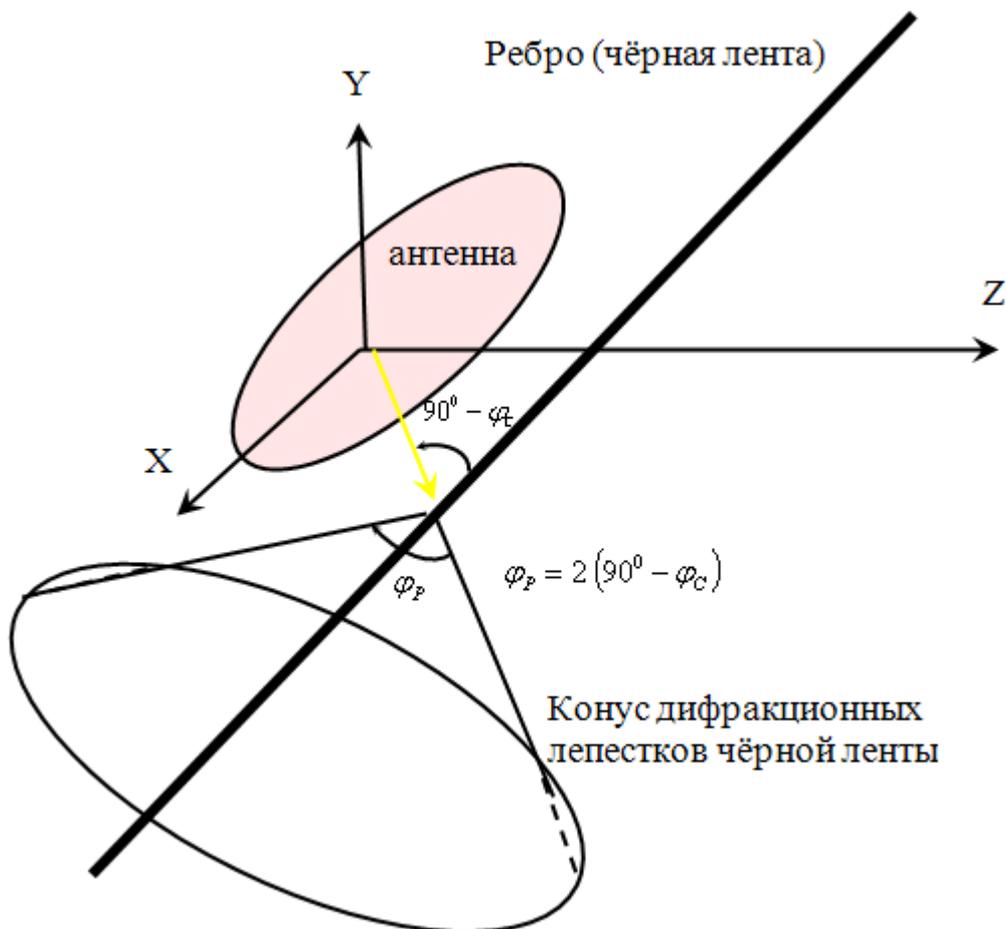


Рисунок 6 - Поле “тёмной” зоны (чёрной ленты) при сканировании

## 2. Некоторые способы снижения влияния ребра радиопрозрачного укрытия на его радиотехнические характеристики

Для достижения высоких радиотехнических характеристик у систем антенна-РПУ необходимо минимизировать влияние ребра на излучение антенны. Можно предложить некоторые способы устранения негативного влияния ребра.

Расчёты показали, что увеличение расстояния от антенны до ребра не позволяет существенным образом улучшить ситуацию. Так как ребро обычно находится в прожекторной зоне антенны, изменение расстояния практически не изменяет характер облучения ребра.

Если это возможно, нужно выполнять РПУ с геометрически тонкими стенками или со стенками с низкой диэлектрической проницаемостью. На рисунке 7 приведены рассчитанные с помощью FEKO и по методике [2] ДН антенны с РПУ (рисунок 1) в случае, когда стенка имеет толщину  $l_c = 1$  мм и  $\varepsilon = 4,0$ . На этом же рисунке представлены ДН антенны с РПУ в случае, когда стенка толщиной  $l_c = 15$  мм имеет трёхслойную конструкцию: снаружи два тонких (1 мм и  $\varepsilon = 4$ ) диэлектрических слоя, а внутри – толстый слой с диэлектрической проницаемостью равной единице (слой из сотового материала). Точками на рисунках 7 а и б показан уровень поля антенны, отражённого от стенки. Можно заметить, что увеличение уровня боковых лепестков в этих случаях связано исключительно с зеркальным отражением поля антенны от стенки. Погрешность расчётов по методике, основанной на принципах ФО, когда значительная часть поверхности РПУ из точки наблюдения видна под скользящими углами, а граница “свет-тень” проходит в окрестности ребра РПУ (сектор углов  $\theta = \pm 40^\circ \dots \pm 50^\circ$ ), также была отмечена в работе [1].

Можно ввести поправки в исходное амплитудно-фазовое распределение (АФР) поля на аппаратуре антенны таким образом, чтобы минимизировать искажения фронта волны, связанные с ребром. Это позволит получить более качественную ДН системы антенна - РПУ. Такой способ вполне реализуем,

если ребро располагается параллельно полотну антенны. Поправки в распределение токов можно рассчитать с помощью корректирующих коэффициентов по методике, описанной в [3]. Алгоритм введения поправок следующий:

1) По измеренным ДН антенны с и без РПУ рассчитываются эквивалентные линейные апертуры вдоль координаты, перпендикулярной ребру;

2) Рассчитываются корректирующие коэффициенты для распределения поля апертуры антенны вдоль направления, перпендикулярного ребру (корректирующие коэффициенты рассчитываются в виде отношения значений эквивалентных апертур антенны без РПУ и антенны с РПУ);

3) Корректировка распределения поля по апертуре антенны вводится в виде произведения первоначального распределения на значения корректирующего коэффициента вдоль линии, перпендикулярной ребру;

4) Корректирующие коэффициенты рассчитываются для всех рабочих частот антенны и для тех углов сканирования в плоскости, перпендикулярной ребру, при которых наблюдается сильное влияние ребра.

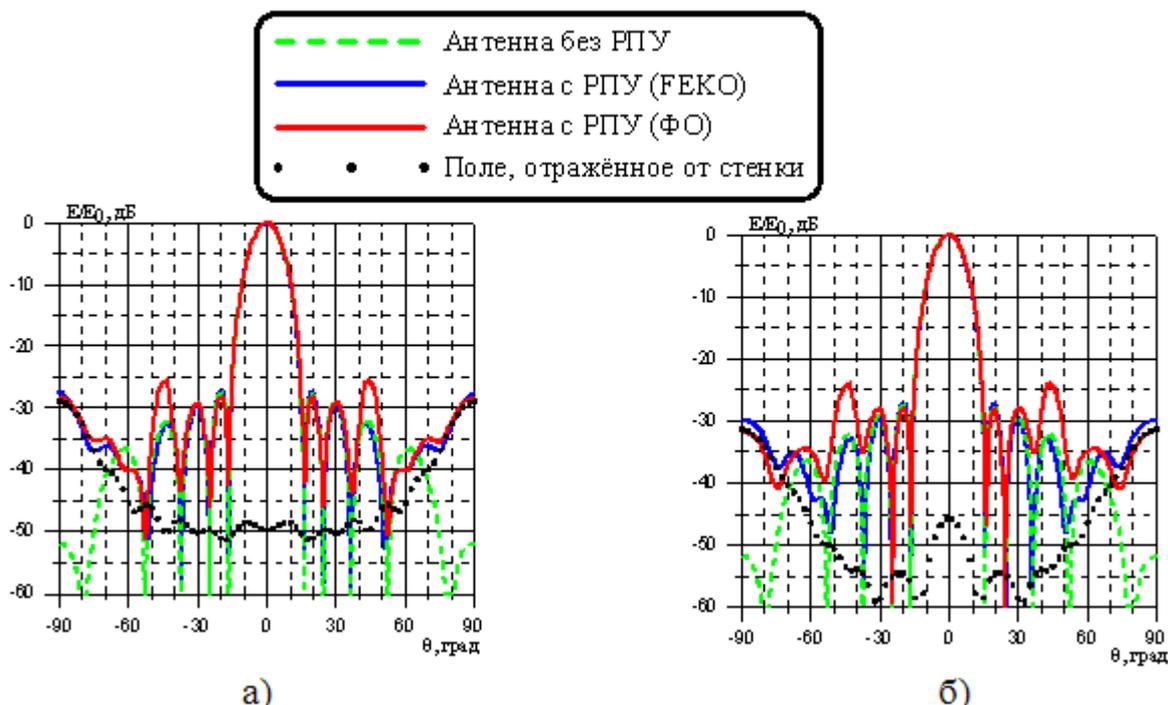


Рисунок 7 – Диаграммы направленности системы «антенна-РПУ» (рисунок 2) в случае а) однослойной стенки и б) трёхслойной стенки

Для примера была проведена такая корректировка распределения поля по апертуре для системы антенна – РПУ, представленной на рисунке 8. РПУ в виде уголка шириной в основании 0,7 м и расстоянием от ребра до апертуры  $L = 0,7\text{ м}$  с оптимальной стенкой пятислойной конструкции из трёх слоёв стеклопластика с диэлектрической проницаемостью  $3,25 - j0,033$  и двух слоёв сот с диэлектрической проницаемостью 1,1. В расчётах учитывались слои лакокрасочного покрытия. Антенна была диаметром  $D_A = 0,6\text{ м}$  с распределением токов (1). Коррекция проводилась на частоте 10 ГГц в плоскости Е (электрическое поле антенны ориентировано перпендикулярно ребру).

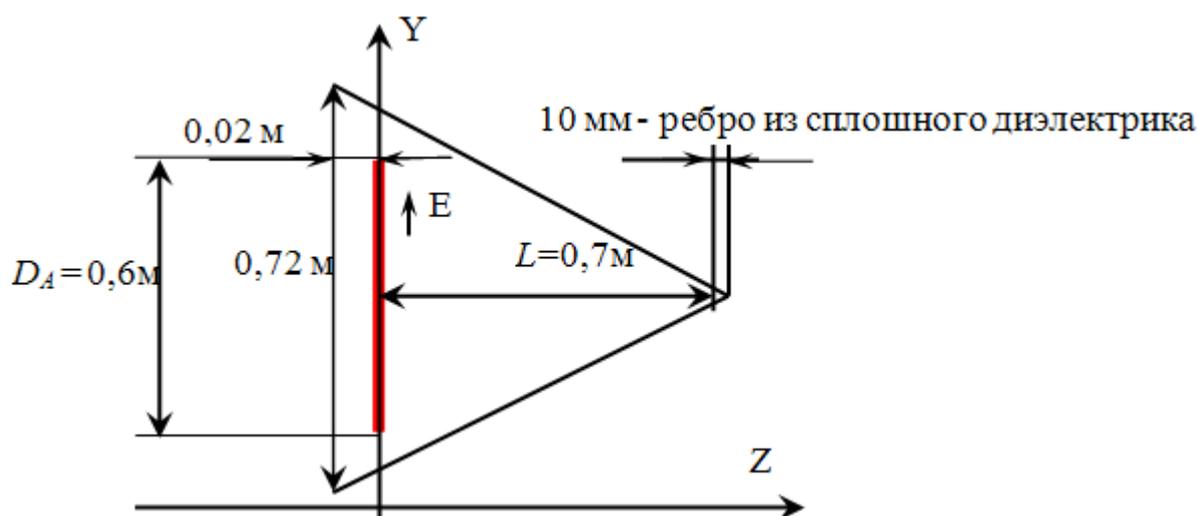


Рисунок 8 – Система антенна - РПУ

На рисунке 9 представлены линейные эквивалентные апертуры антенны без РПУ и с РПУ с ребром на дистанции от центра антенны  $Z = 0,7\text{ м}$  (сразу за РПУ) и на дистанции  $Z = 0,0\text{ м}$  (в зоне антенны). Видно, что наличие ребра приводит к сильному провалу в центре эквивалентной апертуры, что в свою очередь приводит к сильному увеличению уровня бокового излучения (рисунок 9а). В зоне антенны, где требуется введение поправок в распределение поля, токи эквивалентной линейной апертуры антенны с РПУ выходят за геометрические размеры антенны, что не позволяет полностью скомпенсировать влияние ребра с помощью корректирующих коэффициентов.

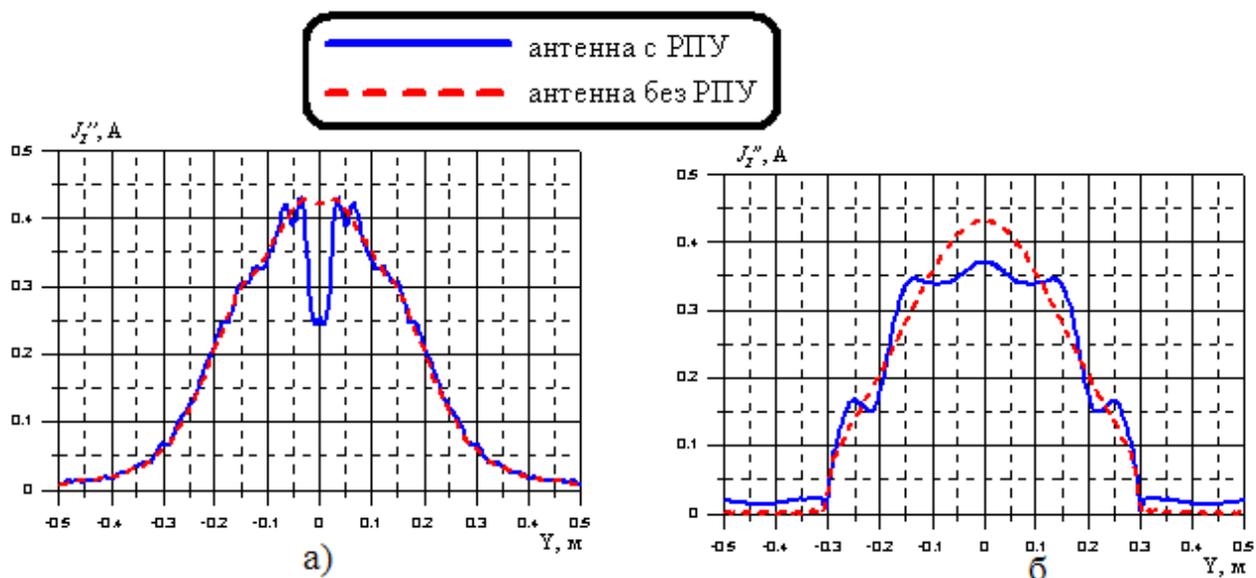


Рисунок 9 – Эквивалентные линейные апертуры система антенна – РПУ  
(рисунок 8) на дистанции а)  $z = 0,7\text{м}$  и б)  $z = 0\text{ м}$

На рисунке 10 представлены рассчитанные в приближении ФО сечения ДН антенны, имеющей РПУ, вдоль конуса дифракционных лепестков при углах сканирования в плоскости ребра  $XZ$   $\varphi_c = 0, 20$  и  $45$  градусов при введении коррекции распределения поля по апертуре.

Можно заметить, что с помощью корректировки распределения поля апертуры возможно снизить уровень только ближних боковых лепестков до углов  $\theta = \pm 15$  градусов. Кроме этого, эффективность корректировки сохраняется лишь при небольших углах сканирования  $\varphi_c$ . При угле сканирования  $\varphi_c = 45^\circ$  удаётся скорректировать только главный и первые боковые лепестки сечения ДН антенны с РПУ.

Более универсальным способом устранить ухудшение радиотехнического качества РПУ является скругление ребра. При этом радиус скругления должен быть больше толщины стенки и соизмерим с длиной волны. Стоит отметить одну особенность РПУ, у которого есть скруглённое ребро. Поле антенны падает на его стенку в разных зонах под разными углами, что приводит к фазовым искажениям фронта волны. Если фазовые искажения будут значительными, то это может привести к существенным искажениям ближних

боковых лепестков ДН антенны с таким РПУ. Для выравнивания фронта волны, падающей на стенку под разными углами, можно использовать дополнительные компенсационные слои с разной толщиной в разных зонах поверхности РПУ.

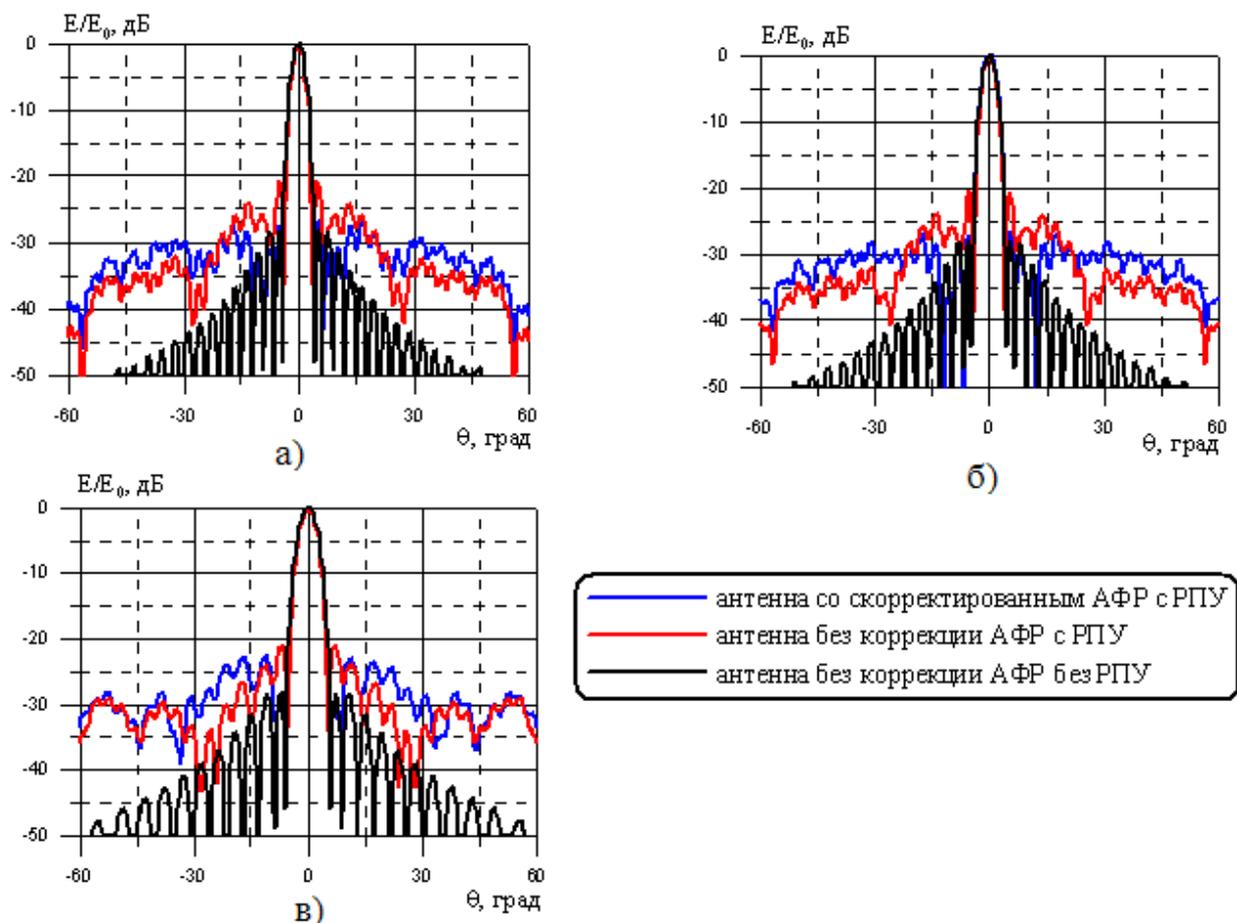


Рисунок 10 – Сечения вдоль конуса дифракционных лепестков ДН антенны с РПУ (рисунок 8) со скорректированным АФР при углах сканирования в плоскости ребра а)  $\varphi_C = 0^0$ ; б)  $\varphi_C = 20^0$  и в)  $\varphi_C = 45^0$

Для демонстрации эффективности введения скругления ребра была исследована система антенна - РПУ, представленная на рисунке 11. Полагалось, что антенна диаметром  $D_A = 0,6\text{м}$  имеет распределение поля (1). Отличие РПУ на рисунке 11 от РПУ на рисунке 9 заключалось: 1) в оживальной форме его образующих; 2) в скруглении ребра радиусом 40 мм и 3) в нанесении компенсационного слоя в области скругления ребра. Компенсационный слой моделировался слоем диэлектрика ( $\epsilon=3,7$ ), нанесённого на внутреннюю

поверхность стенки РПУ в зоне скругления, с плавно меняющейся толщиной от 0 до 0,7 мм.

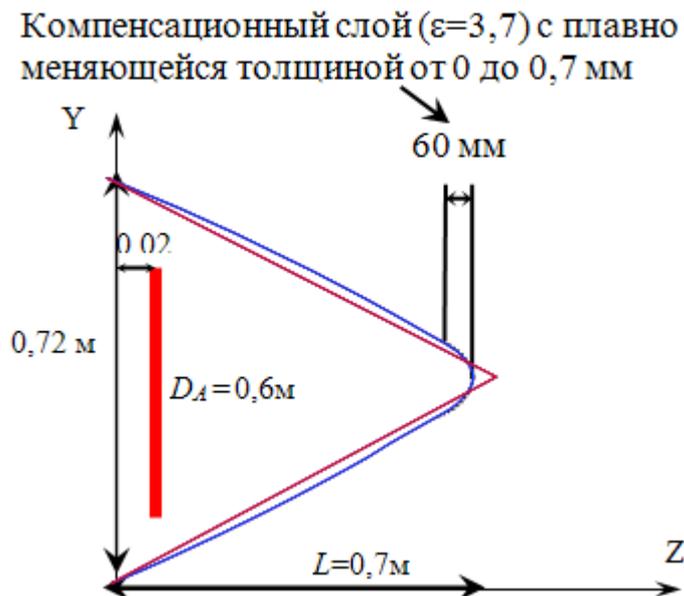


Рисунок 11 – Система антенна – РПУ со скруглённым ребром

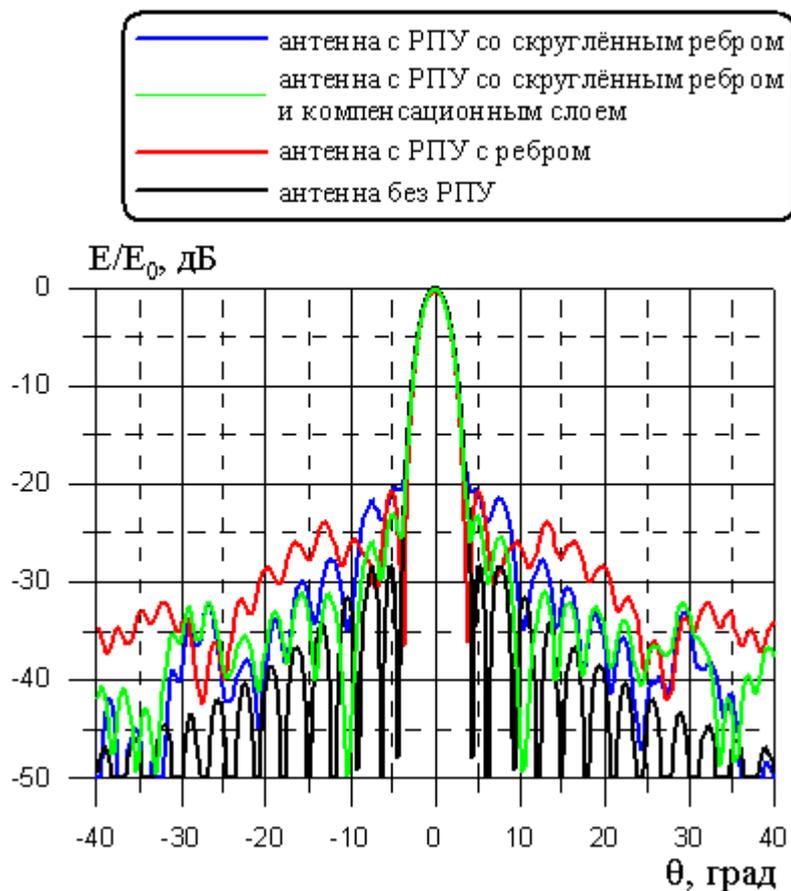


Рисунок 12 – ДН антенны с РПУ в E плоскости, перпендикулярной ребру

Рассчитанные в приближении ФО ДН такой системы представлены на рисунке 12. Можно заметить, что скругление ребра позволило заметно снизить искажения ДН вблизи главного лепестка. Первые боковые лепестки остались на высоком уровне из-за фазовых искажений фронта волны при прохождении стенки под разными углами. Применение компенсационного слоя позволяет заметно снизить фазовые искажения. В рассчитанных ДН по методике, основанной на принципах ФО, антенны с РПУ со скруглённым ребром для углов  $\theta$  больше  $40^\circ$  наблюдается существенная погрешность, связанная с границей “свет-тень”.

### **3. Использование метаматериала для радиопрозрачного укрытия с ребром**

Как было показано в предыдущем разделе статьи, ребро, выполненное из материала с диэлектрической проницаемостью близкой к единице, минимальным образом влияет на излучение антенны. К сожалению, материалы с низкой диэлектрической проницаемостью обладают низкой прочностью, что не позволяет выполнять из них РПУ, испытывающие высокие механические нагрузки. Для изготовления нерадиопрозрачных элементов РПУ, таких как рёбра или носики, можно использовать метаматериал, который может обладать высокой прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице в некоторой полосе частот. Свойства такого материала были описаны в [7].

В [7] был исследован бесконечный плоский слой такого метаматериала. Кроме этого было показано, что этот метаматериал обладает пространственной дисперсией магнитной проницаемости при наклонном падении волны при параллельной поляризации. Какими свойствами будет обладать объёмный объект, изготовленный из такого метаматериала, пока неизвестно. Для проверки возможности использования метаматериала для снижения влияния нерадиопрозрачных элементов конструкции РПУ на характеристики антенны были проведены расчёты ДН антенны методом ИУ с помощью пакета программ ФЕКО. Перед антенной устанавливались два варианта таких конструкций РПУ, выполненных из метаматериала. Требуемый метаматериал можно получить с помощью индуктивных включений в виде проводов скрученных в спирали и

помещённых посередине диэлектрического слоя [7]. В расчётах метаматериал моделировался резистивными (в FEKO они называются импедансными, что неверно) полосками с поверхностным сопротивлением индуктивного типа таким, чтобы метаматериал был настроен на рабочую частоту антенны (5 ГГц). Такие полоски хорошо моделируют электродинамические свойства проводов, скрученных в спирали. Как проводить расчёт параметров таких индуктивных включений, подробно описан в [7,8].

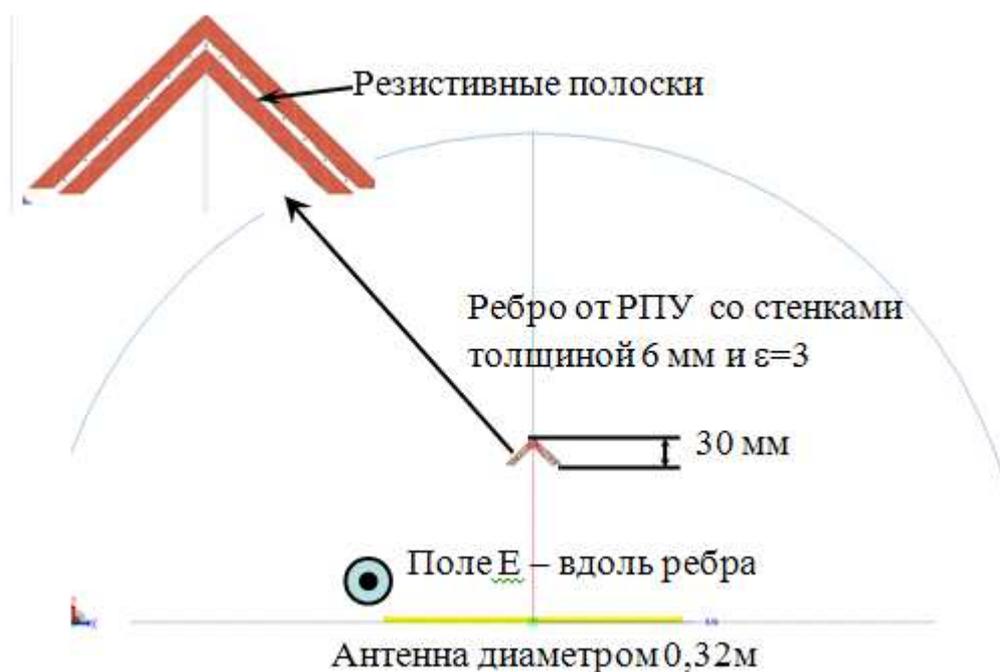


Рисунок 13 – Антенна с установленным перед ним ребром из метаматериала

На рисунке 13 показана антенна, перед которой на расстоянии 0,2 м установлено ребро от РПУ с рисунка 2. Это ребро выполнено из диэлектрика с диэлектрической проницаемостью 4 и толщиной стенок 6 мм. В центр стенок внедрены с периодом 5 мм резистивные полоски шириной 0,3 мм и индуктивным поверхностным сопротивлением 5,2 Ом на квадрат на частоте 5 ГГц. На рисунке 14 представлены рассчитанные ДН структуры (рисунок 13) на частотах 5 ГГц и 6 ГГц. Видно, что на частоте настройки метаматериала 5 ГГц (рисунок 14а) ребро практически не меняет ДН антенны, а на частоте 6 ГГц (рисунок 14б) искажения ДН антенны за счёт ребра существенно меньше в сравнении со случаем, когда ребро выполнено из обычного диэлектрика.

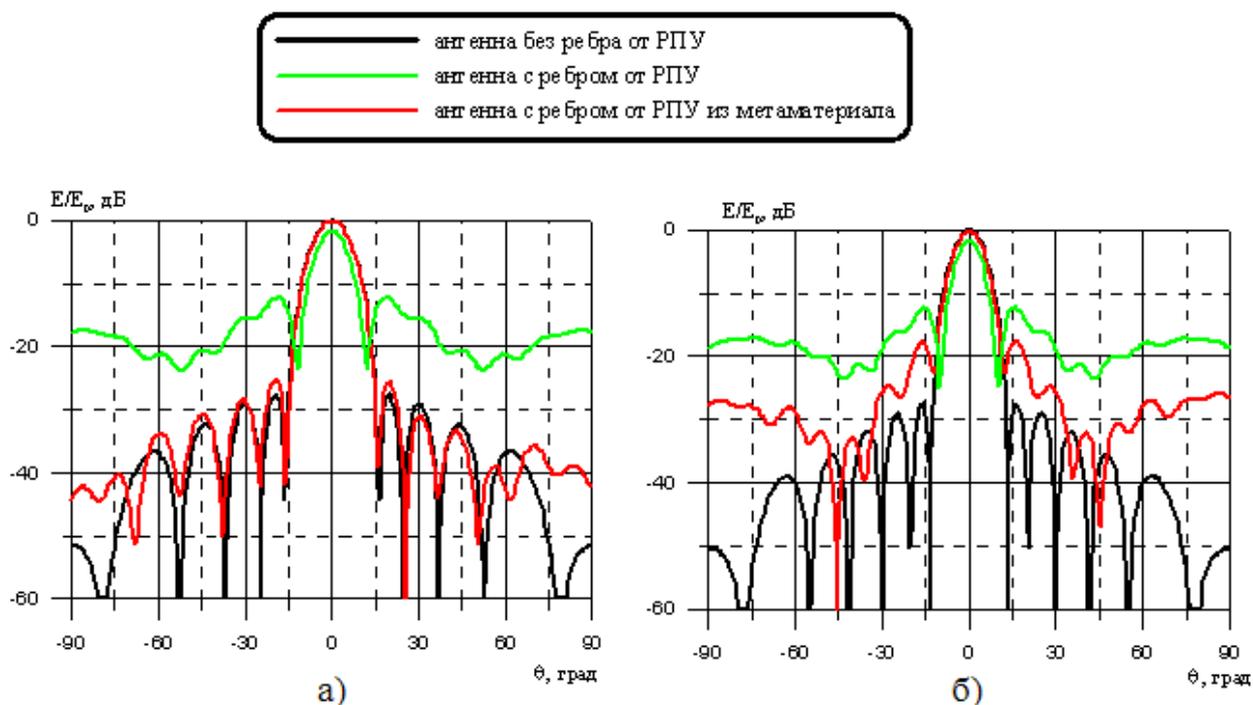


Рисунок 14 – ДН антенны с установленным перед ним ребром из метаматериала  
 а) на частоте 5 ГГц и б) 6 ГГц

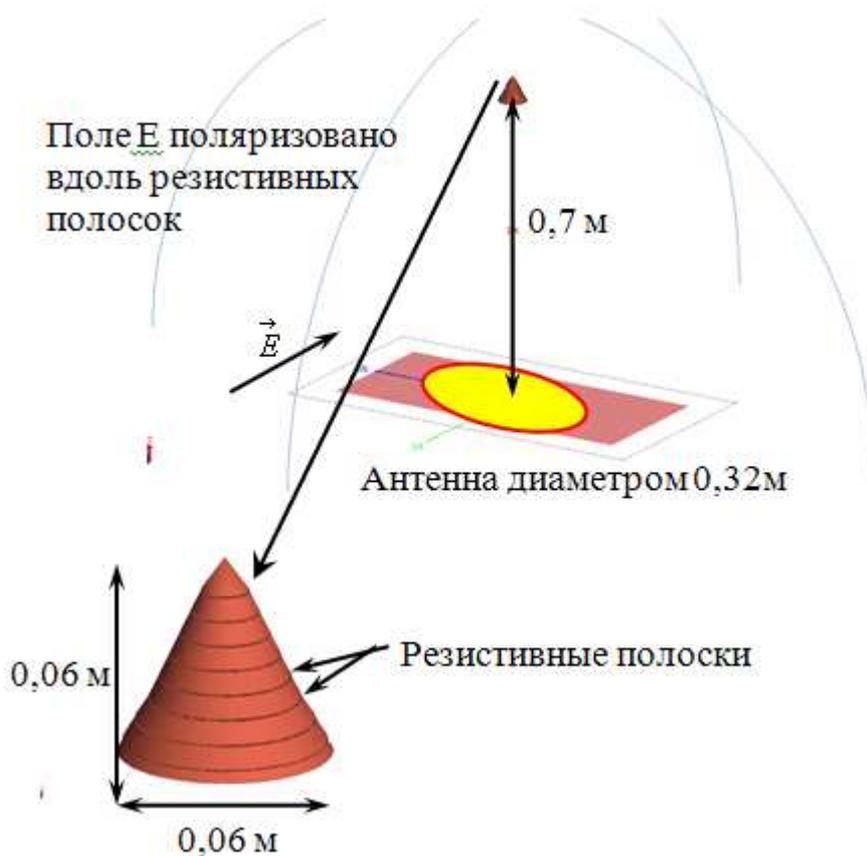


Рисунок 15 – Антенна с установленным перед ним носиком из метаматериала

На рисунке 15 показана антенна, перед которой на расстоянии 0,7 м установлен конус, моделирующий носик носовых обтекателей самолёта (или ракет). Носик выполнен из такого же метаматериала, что и ребро в предыдущем примере, только резистивные полоски имели разную длину такую, чтобы они помещались в носике.

На рисунке 16 приведены рассчитанные ДН структуры (рисунок 15) на частоте 5 ГГц в случае, когда носик выполнен из метаматериала (вариант 1) и в случае, когда он выполнен из обычного диэлектрика (вариант 2). Также на рисунке 16 приведены поля рассеяния обоих вариантов носика. Видно, что поле рассеяния первого варианта носика ниже на 5...6 дБ в сравнении со вторым вариантом почти во всём угловом диапазоне. Как следствие, первый вариант носика меньше искажает ДН антенны. Расчёты показывают, что низкий уровень рассеянного поля первого варианта носика сохраняется в широком диапазоне частот.

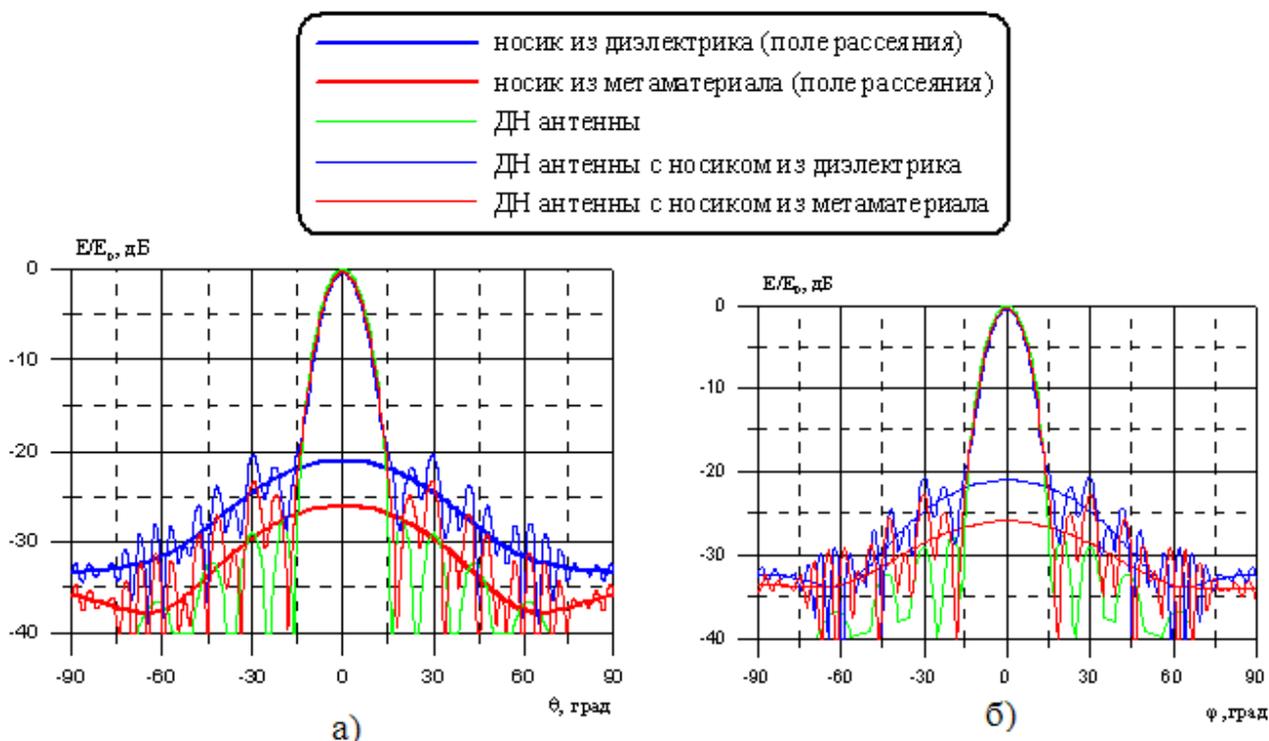


Рисунок 16 – ДН антенны с установленным перед ним носиком из метаматериала на частоте 5 ГГц в а) плоскости Е и б) плоскости Н

Представленные в этом разделе расчёты наглядно показывают, что нерадиопрозрачные конструкции, которые могут быть у РПУ, выполненные из метаматериала, существенно меньше влияют на поле излучения антенны. При этом вполне возможно, что всё РПУ необходимо будет выполнять из метаматериала, чтобы избежать фазовых искажений при прохождении волны через участки РПУ с разными коэффициентами пропускания. Это, конечно, существенно усложнит производство РПУ.

### **Заключение**

Из приведённых в статье исследований хорошо видно, что наличие у РПУ ребра существенно ухудшает радиотехнические характеристики антенны. Показано, что наличие ребра у радиопрозрачного укрытия приводит к образованию тёмной зоны в фронте волны, что в свою очередь приводит к образованию конуса боковых лепестков с высоким уровнем у диаграммы направленности антенны.

В статье были исследованы способы устранения негативного влияния ребра на радиотехническое качество радиопрозрачного укрытия: 1) уменьшение геометрического размера ребра или снижение диэлектрической проницаемости материала ребра; 2) коррекция диаграммы направленности; 3) скругление ребра. Первый способ не всегда может быть реализован, так как тонкие стенки РПУ вблизи ребра существенно снижают его механическую прочность. Второй способ малоэффективен, так как для полной коррекции ДН необходимо увеличивать геометрические размеры антенны. Более универсальным способом устранить ухудшение радиотехнического качества РПУ является третий вариант – скругление ребра. При этом для достижения максимальных радиотехнических характеристик антенны в зоне скругления необходимо наносить специальный компенсирующий слой диэлектрика, который выравнивает фазу фронта волны, падающей на стенку под разными углами.

Дополнительно в статье проведены исследования нерадиопрозрачных конструкций РПУ, выполненных из метаматериала. Использование метаматериала для изготовления радиопрозрачных укрытий с ребром (или

большим носиком), возможно, позволит улучшить их радиотехническое качество. В дальнейшем необходимо провести дополнительные численные и экспериментальные исследования РПУ, выполненных из метаматериала.

### Литература

1. Комаров А.А., Пермяков В.А. "Дифракция плоской электромагнитной волны на прямоугольном диэлектрическом клине. Анализ численных результатов" // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2011. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep11/8/text.pdf>

2. Басков К.М., Федоренко А.И. "Методика расчёта радиотехнических характеристик системы "антенна-обтекатель" // Доклады 2-й Всероссийской Микроволновой конференции. Москва, 26-28 ноября 2014, с. 215-220.

3. Басков К.М., Бобков Н.И., Краснолобов И.И., Семененко В.Н. "Моделирование сверхширокополосной зеркальной антенны" // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. № 4. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr13/9/text.pdf>

4. Уфимцев П.Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамики. Под ред. Копылова Б.И. - М: Бином. Лаборатория знаний. 2007.

5. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar cross section. – Artech House Inc., 1993, p. 637.

6. Елизаров С.В., Краснолобов И.И., Лебедев А.М., Семененко В.Н., Федоренко А.И., Фурманова Т.А. "Минимизация вклада в обратное рассеяние от поверхностных волн на тонком металлическом стержне" // Труды конференции "Излучение и рассеяние электромагнитных волн", Таганрог, 2013, с. 329-333.

7. Басков К.М. "Метаматериал с повышенной механической прочностью и диэлектрической проницаемостью близкой к единице" // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2013. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/14/text.pdf>

8. Басков К.М. “Стенка радиопрозрачного укрытия, состоящая из диэлектрических слоев и компенсационных металлических решеток” // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2011. № 12.

URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec11/14/text.pdf>