

ЭКРАНЫ С ОТСЕЧКОЙ ПОЛЯ

Д. В. Татарников, И. М. Чернецкий

Топкон Позизионинг Системс, Московский Авиационный Институт

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2015 г.

Аннотация. Рассматривается повышение крутизны отсечки поля при переходе в нерабочую область углов (область тени) путем дополнения основного экрана антенны полупрозрачными ребрами, параллельными направлению основного излучения. Построена математическая модель, выполнены расчеты и натурный эксперимент. Показана возможность реализации отсечки на величины порядка 20дБ в области малых углов к плоскости основного экрана. Результаты имеют отношение к задачам улучшения электромагнитной совместимости, помехозащищенности и уменьшения ошибки многолучевости.

Ключевые слова: дифракция на полуплоскости, полупрозрачный слой, зона полутени, ДН с отсечкой поля.

Abstract. Opportunities to achieve a cut-off pattern in semi-shadow area of an antenna by supplementing the ground plane with a system of semi-transparent ribs parallel to the direction of the main lobe are discussed. Mathematical models have been developed, computer simulation have been performed, results have been proved by experimental studies. It has been shown that a cut-off of about 20dB is achievable. Results are relevant to electromagnetic compatibility, jamming protection and multipath error mitigation.

Key words: half-plane diffraction, semi-transparent sheet, semi-shadow zone, cut-off pattern.

1. Введение

Пользуясь оптической аналогией, электродинамические экраны предназначены для затенения части пространства. Экраны являются неотъемлемым элементом большинства антенн где служат для уменьшения излучения в нерабочую область углов.

Как правило, экран антенны располагается перпендикулярно направлению основного излучения. Схематично эта конфигурация изображена на рис 1. Здесь поле антенны в нерабочем «нижнем» полупространстве создается за счет

дифракции на ребрах экрана. Однако, при пересечении плоскости экрана КУ антенны падает весьма медленно. Применительно к слабонаправленным антеннам некоторые оценки приведены в [1,2]. В области полутени поле описывается интегралом типа Френеля; для создания резкой убыли (отсечки) поля необходимы экраны весьма большого электрического размера.

С целью создания резкой отсечки поля при пересечении плоскости экрана в данной работе рассматривается дополнение основного экрана элементами, параллельными направлению основного излучения. Эти элементы далее для краткости называются вертикальными ребрами; конфигурация схематично показана на рис. 2. Такая конфигурация представляется целесообразной, когда требуется резко уменьшить уровень ДН в нерабочей (нижней) части пространства, начиная от малых углов к плоскости основного экрана. Соответствующие задачи возникают в связи с улучшением помехозащищенности и электромагнитной совместимости. Эта же задачи типичны для систем высокоточного спутникового позиционирования. В последнем случае желательна равномерная ДН в рабочей (верхней) полусфере с резкой отсечкой при пересечении местного горизонта.

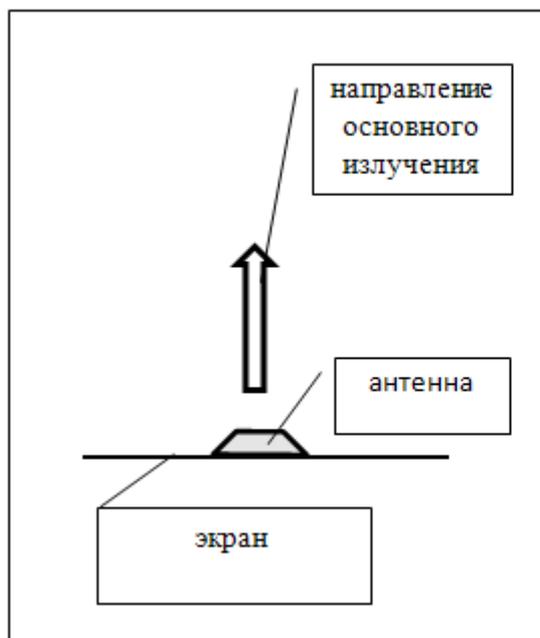


Рис.1 Антенна с экраном.

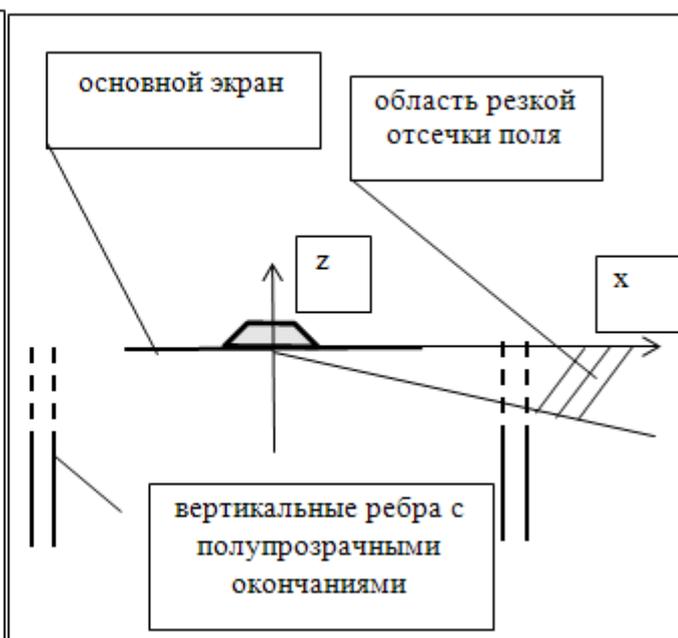


Рис.2 Антенна с экраном, дополненным вертикальными ребрами.

Вертикальные элементы (ребра) могут быть металлическими (проводящими). Однако, убыль полутеневого поля можно ускорить, если часть поверхности вертикальных элементов выполнить полупрозрачной. Отметим, что дополнение металлических отражающих поверхностей полупрозрачными окончаниями рассматривалось в [4...6] применительно к зеркальным антеннам. Однако оценок достижимых величин отсечки поля в этих работах не приводится. Возбуждение полуплоскости с полупрозрачным окончанием рассматривалась в [3]. Полупрозрачные области отмечены на рис.2 пунктирными линиями.

Данная работа продолжает [3]. Поскольку основной интерес представляет ДН в области малых углов ниже плоскости основного экрана (горизонта), для упрощения расчетов принята модель вертикальных ребер в виде полуплоскостей, неограниченных в направлении $z < 0$ (рис.2). В разделе 2 работы приводится численная модель и результаты анализа дифракции поля слабонаправленного источника на системе ребер с полупрозрачными окончаниями, раздел 3 посвящен модели замкнутого экрана в двумерном приближении, в разделе 4 приводятся данные натурального эксперимента.

2. Система ребер с полупрозрачными окончаниями

Геометрия задачи приведена на рис.3. Здесь изображена система ребер в виде полуплоскостей, параллельных оси z . Идеально проводящие части показаны сплошными линиями, а полупрозрачные – пунктиром. Задача двумерна и однородна относительно направления, перпендикулярного чертежу. Полупрозрачность понимается в смысле выполнимости усредненных граничных условий для электрически тонкого листа в виде [7]

$$\begin{aligned} \vec{E}_\tau^+ &= \vec{E}_\tau^- \\ [\vec{n}_0, \vec{H}_\tau^+ - \vec{H}_\tau^-] &= \vec{j}_s^e = \vec{E}_\tau^+ / Z_g \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\vec{E}(\vec{H})_\tau^{+,-}$ - касательные компоненты полей по обе стороны от листа, единичный вектор нормали \vec{n}_0 направлен как показано на рис.3, \vec{j}_s^e - поверхностная плотность эквивалентного электрического тока по листу,

квадратные скобки означают векторное произведение, Z_g - параметр, названный сеточным импедансом в [8]. Предполагается, что импеданс - чисто реактивный и является функцией координаты z . Для идеально проводящих частей полуплоскостей $Z_g = 0$.

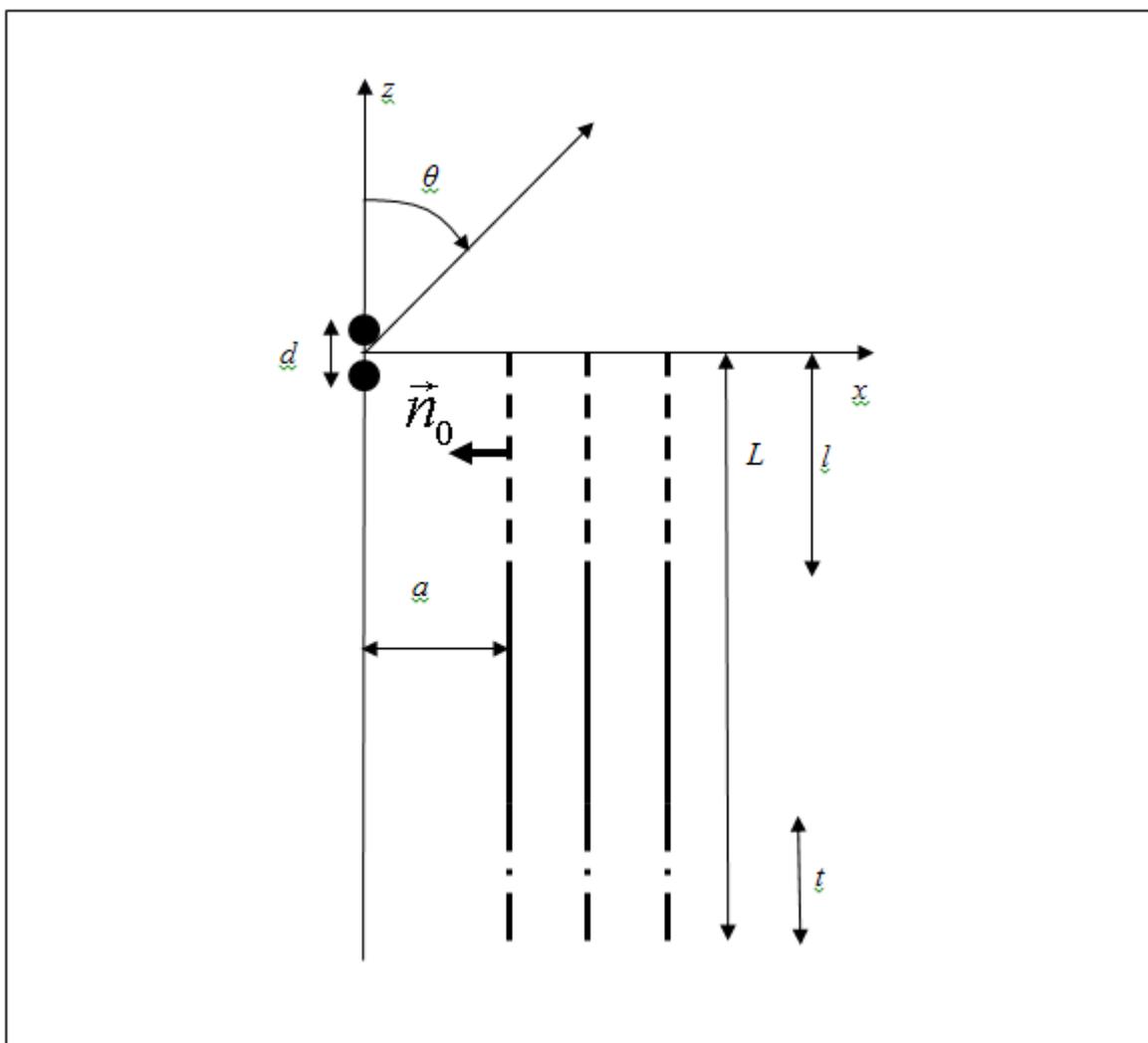


Рис.3 К задаче дифракции поля слабонаправленного источника на системе ребер с полупрозрачными окончаниями.

Предполагается, что структура возбуждается слабонаправленным источником. Для придания некоторой направленности по отношению к оси z источник выбран в виде двух неограниченных синфазных нитей тока, перпендикулярных чертежу, так что плотность тока источника $\vec{j}_{1,2} = I_{1,2} \delta(z \mp d/2) \delta(x) \vec{y}_0$. Здесь $\delta(\cdot)$ - дельта-функция. Эти нити отмечены черными точками на рис.3 Расстояние между нитями $d \ll \lambda$. Здесь λ - длина

волны. Если амплитуды токов нитей связаны соотношением $I_2 = -I_1 \exp(-ikd)$, то в свободном пространстве источник формирует ДН в виде кардиоиды $(1 + \cos(\theta))/2$, так, что излучение в направлении $\theta = \pi$ подавлено.

Поставленная задача сводится в системе интегральных уравнений вида

$$Z_g \vec{j}_p^e = \left(\sum_{q=1}^N \int_{S_q} \hat{G} \vec{j}_q^e ds + \vec{E}^{cmop} \right) |_{S=S_p}; \quad p = 1, \dots, N$$

Здесь S_p - поверхность ребра с номером p , \vec{j}_p^e - плотность эквивалентного электрического тока этого ребра, \hat{G} - функция Грина, \vec{E}^{cmop} - поле источника в свободном пространстве, N - общее число ребер. Система уравнений решается численно методом моментов. Для этого используется разложение неизвестного тока \vec{j}_p^e по базису конечных элементов. В случае Н-поляризации, когда вектор Н параллелен ребрам, источник представляет собой нити магнитного тока. В качестве базиса используются треугольные функции аналогично [1]. Для Е-поляризации, когда ребрам параллелен вектор Е, источник - нити электрического тока. Здесь разложение тока \vec{j}_p^e можно выбрать кусочно-постоянным. Функция Грина \hat{G} представляется в виде разложения по спектру плоских волн с характеристической осью x . Интегрирование в спектральной области выполняется численно и трудностей не вызывает.

В процессе расчетов протяженность ребер по координате z выбиралась конечной и равной $L \sim 40\lambda$. При этом пространство между двумя соседними ребрами представляет собой плоскопараллельный волновод; излучение из открытых концов этих волноводов, расположенных при $z = -L$, значительно искажает ДН в области углов, представляющих интерес. Для нейтрализации этого эффекта нижняя часть ребер протяженностью $l' \approx 1...2\lambda$ выбиралась полупрозрачной с резистивным импедансом. Импеданс подбирался так, чтобы влияние излучения открытых концов волноводов на ДН было незначительным.

Импеданс в верхней части ребер протяженностью $l \sim \lambda$ оптимизировался с целью получения наискорейшей убыли значений ДН в области малых углов

ниже горизонта $\theta = \pi/2$. Наряду с ДН $F(\theta)$, всюду ниже показано отношение $DU(\theta^e) = F(\pi/2 + \theta^e) / F(\pi/2 - \theta^e)$. Здесь θ^e - угол возвышения над горизонтом. Это отношение (от англ. down-up), в частности, определяет ошибку систем высокоточного спутникового позиционирования за счет отражений от подстилающего рельефа. Рассмотрим результаты расчетов.

На рис.4,5 показаны результаты для одного ребра для Н- и Е- поляризации, соответственно. Ребро расположено на расстоянии $a = 2.25\lambda$ (а) и $a = 3.75\lambda$ (б). При дальнейшем росте расстояния a результаты изменяются медленно поскольку характер возбуждения приближается к плоской волне. Кривые 1 на графиках соответствуют идеально проводящему ребру, кривые 2 – ребру с полупрозрачным окончанием. Можно отметить, что введение полупрозрачного окончания заметно сказывается на характеристиках для Н-поляризации. Здесь в диапазоне углов $\theta^e = 10...40^\circ$ наблюдается уменьшение (улучшение) $DU(\theta^e)$ на величину порядка 10дБ и более по сравнению с идеально проводящим ребром. Для Е-поляризации отмеченное улучшение несколько менее заметно и наблюдается в диапазоне $\theta^e = 20...40^\circ$. На графиках заметны осцилляции в области высоких θ^e вследствие паразитной дифракции на нижнем окончании ребра.

Рассмотрим случай, когда в пространство между источником и первым ребром, отстоящим на $a = 2.25\lambda; 3.75\lambda$ от источника, соответственно, вносится промежуточное второе ребро, отстоящее на $a = \lambda$ от источника. Соответствующие результаты показаны кривыми 3 на графиках рис 4, 5. Из сравнения этих графиков с результатами для одного ребра (кривые 2) следует, что внесение промежуточного ребра весьма заметно сказывается на улучшении отношения $DU(\theta^e)$ для Н-поляризации в области крутой отсечки поля. Здесь улучшение достигает 5...7дБ. Расчеты показали, что дальнейшее внесение дополнительных промежуточных ребер не приводит к существенному улучшению характеристик.

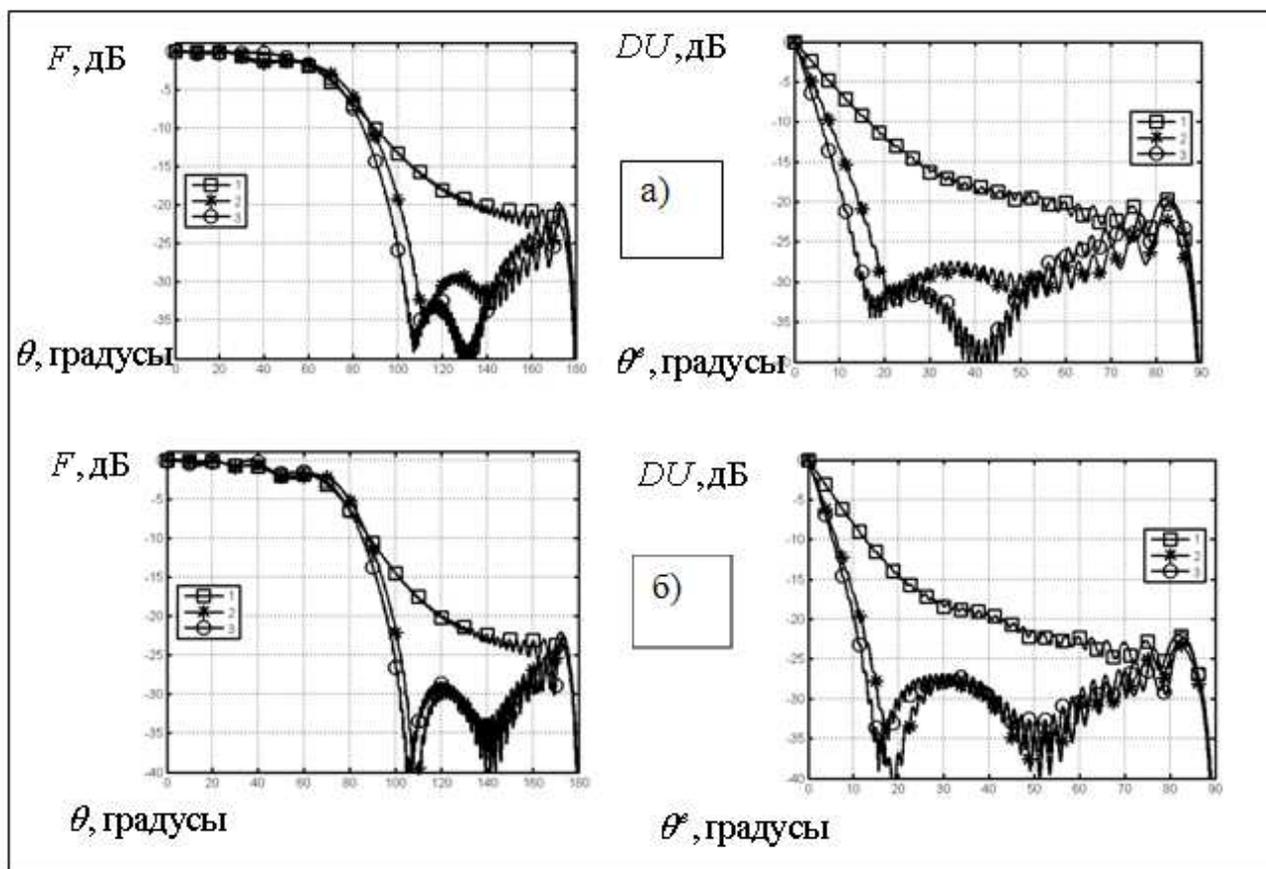


Рис. 4. Система ребер, Н-поляризация.

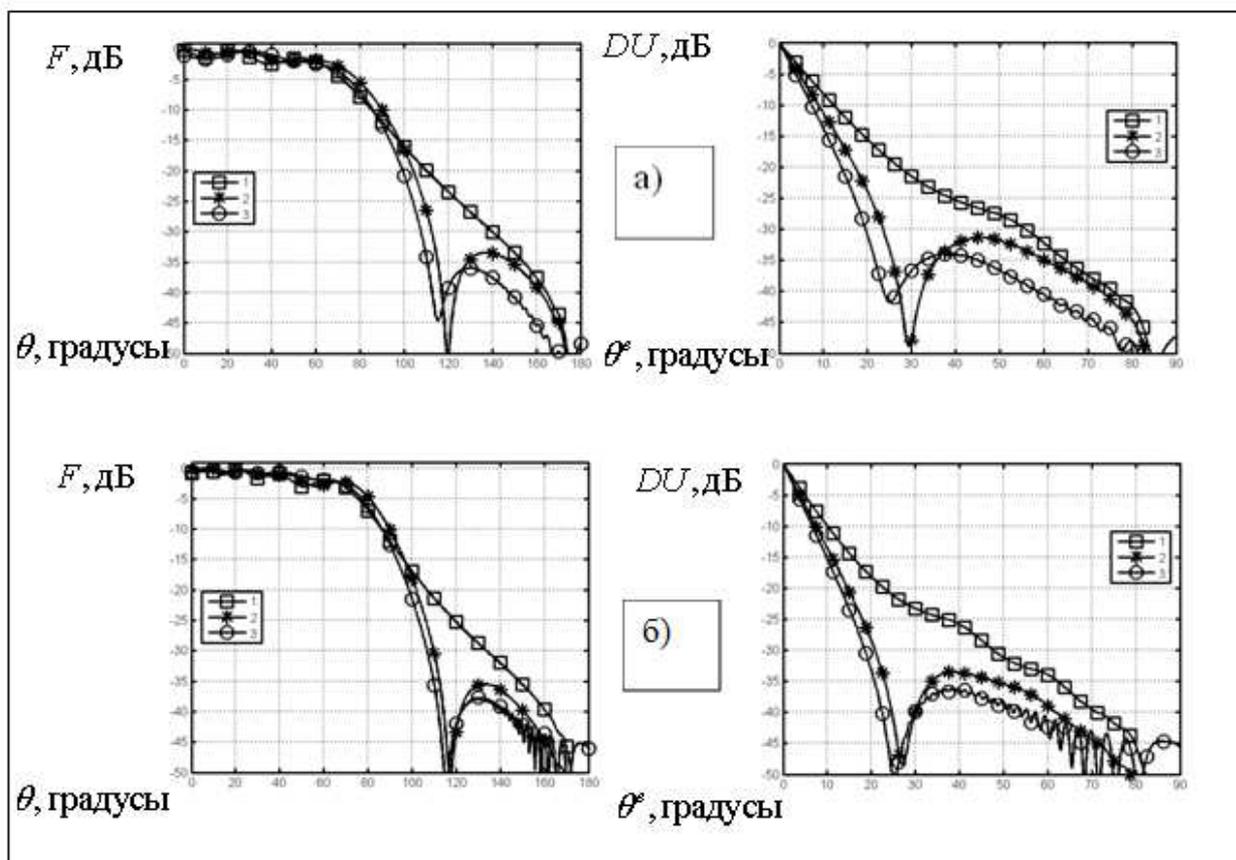


Рис. 5. Система ребер, Е-поляризация.

3. Модель замкнутого экрана

При наличии вертикального экрана в виде цилиндрической трубы, замкнутой вокруг антенны, возникают дополнительные явления переотражения поля. Некоторую оценку этих явлений можно получить с помощью двумерного приближения, показанного на рис. 6. Здесь показан источник в виде двух нитей тока, аналогично рис. 3. Экран представляет собой два ребра, расположенные по разные стороны от источника.

В рассматриваемом приближении экран представляет собой полубесконечный отрезок плоскопараллельного волновода. Для построения расчетной модели в систему вводится идеально проводящая перегородка S . Перегородка расположена на расстоянии L от раскрытия волновода. Это расстояние выбрано так, что излучением токов, протекающих по внешним поверхностям ребер в области $z < -L$, можно пренебречь. Таким образом, электрический ток ребер в области $z < -L$ соответствует набору собственных волн плоскопараллельного волновода, распространяющихся в направлении $z = -\infty$. Электрический ток ребер в области $-L < z < 0$ и ток на самой перегородке разлагается по базису конечных элементов. Для компенсации влияния перегородки по обеим ее сторонам вводится эквивалентный магнитный ток. Этот последний показан на рис. 6 штрих-пунктиром. Магнитный ток разлагается по базису, соответствующему собственным волнам волновода. Поля всех введенных источников в области $-L < z < 0$ представляются в виде разложений по спектру плоских волн свободного пространства, а в области $z < -L$ – в виде разложений по собственным волнам плоскопараллельного волновода. Интегральные уравнения задачи получаются из граничных условий на поверхности ребер в области $-L < z < 0$ аналогично разделу 2, и из условия непрерывности касательных компонент полей при переходе через перегородку. Уравнения решаются численно методом моментов.

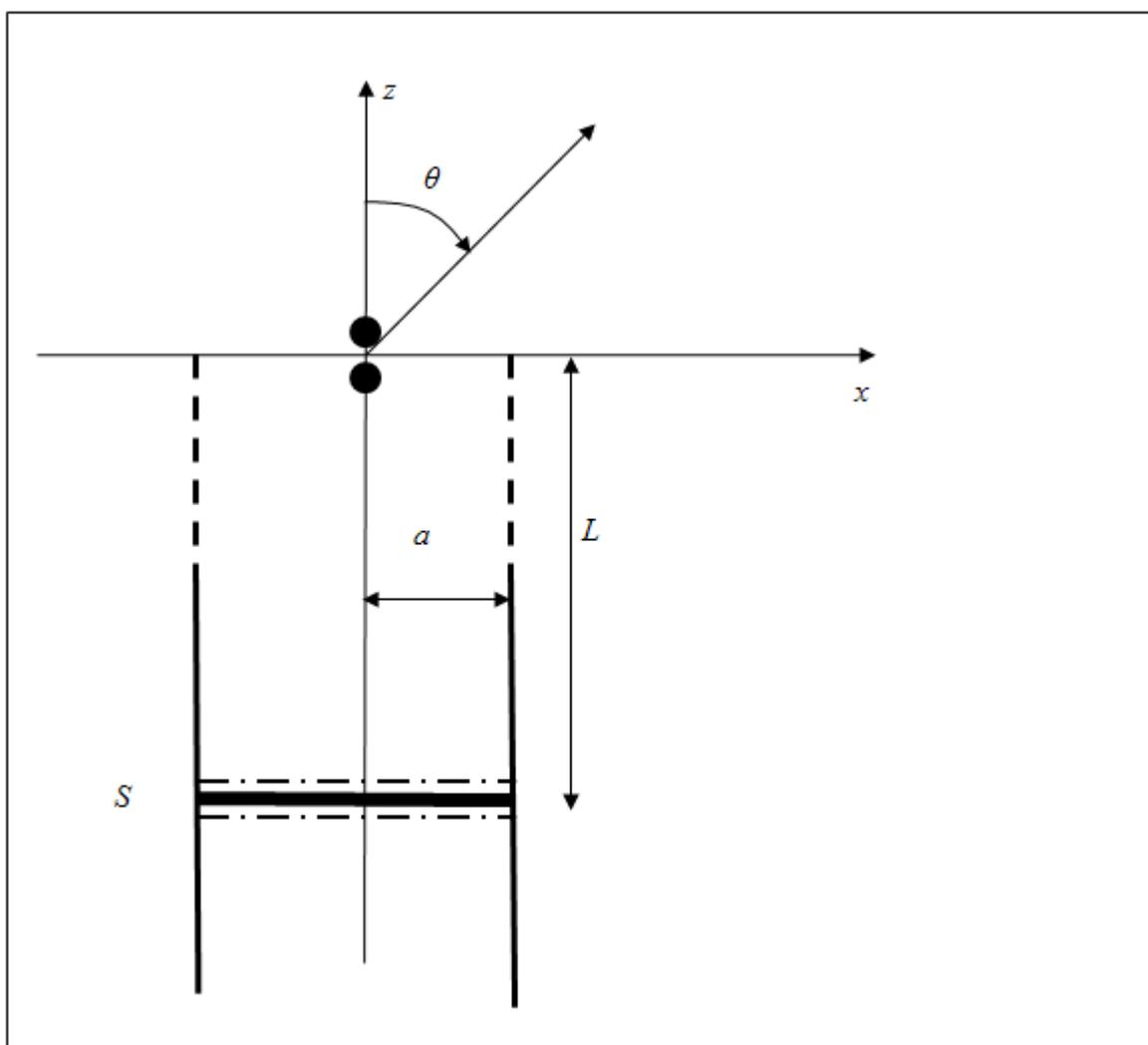


Рис. 6 Модель замкнутого экрана.

На рис. 7, 8 показаны расчетные результаты для экрана с размером a равным 2.25λ (кривые 2). Для сравнения на графиках нанесены соответствующие результаты для полупрозрачного ребра, расположенного по одну сторону от источника (кривые 1). Эти последние перенесены из графиков рис. 4,5 а). Можно отметить, что введение замкнутого экрана в основном приводит к появлению осцилляций на уровне порядка 5дБ в верхней (рабочей) полусфере. Также заметен незначительный рост уровня ДН в области глубокой тени. Крутизна отсечки ДН для малых углов к горизонту, в целом, сохраняется, а для Е-поляризации - несколько возрастает (улучшается).

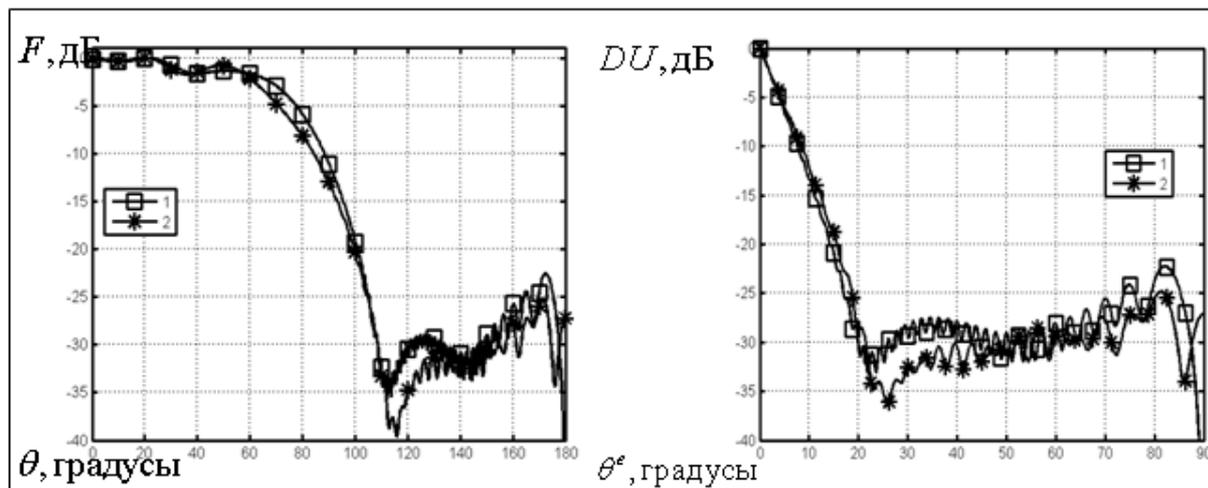


Рис. 7. Замкнутый экран, Н-поляризация.

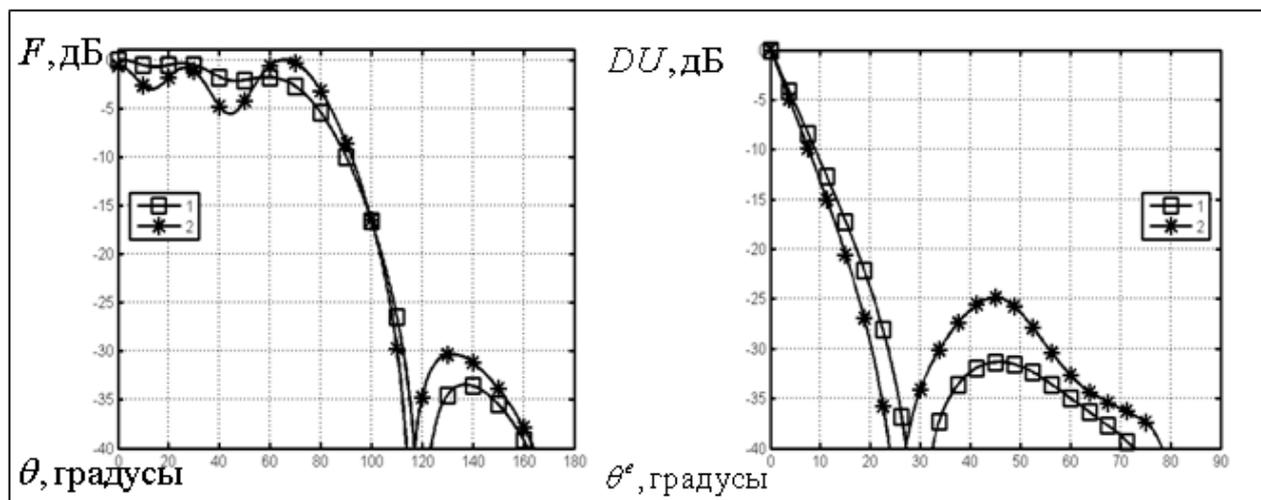


Рис. 8. Замкнутый экран, Е-поляризация.

4. Результаты натурального эксперимента

Расчетные данные были проверены с помощью экспериментальной установки, показанной на рис. 9. Установка представляет собой совокупность экрана 1 с полупрозрачным окончанием 2, антенного элемента 3 и поглотителя 4. Этот последний служит для подавления осцилляций ДН, обусловленных возбуждением дальнего нерабочего края экрана. Установка вращалась относительно вертикальной оси 5. Измерения проводились на частоте 1575 МГц. Экран выполнен из листа стеклотекстолита толщиной 1.5мм, металлизированного с одной стороны за исключением области 2, которая выполнена в виде щелевой структуры с впаянными в щели навесными

компонентами. Величина импеданса такой структуры составляет $Z_g = i0.65W_0$.
Здесь W_0 - волновое сопротивление свободного пространства.

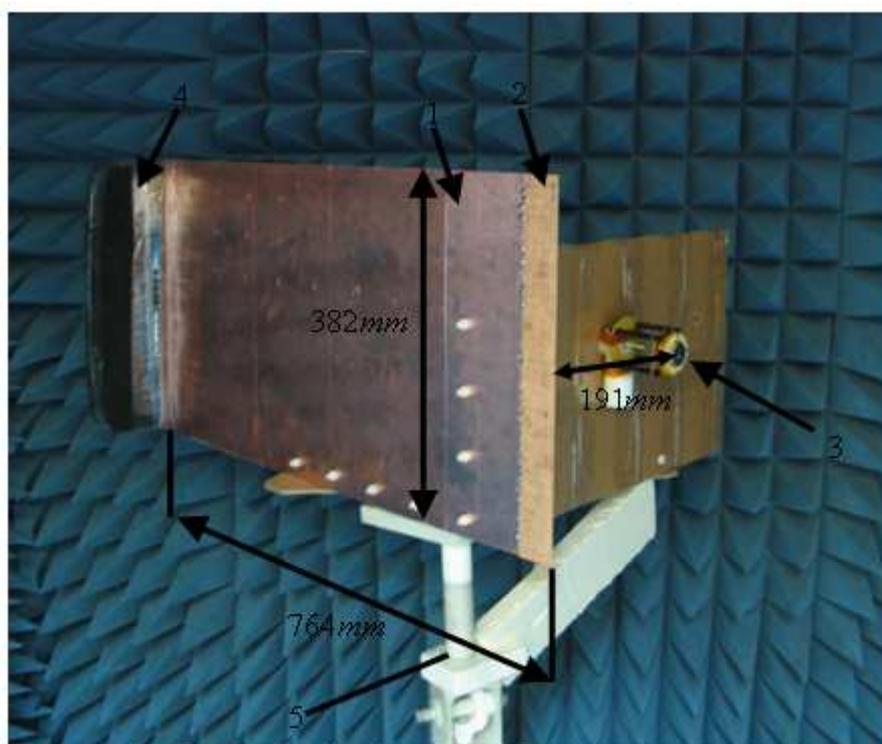


Рис.9 Экспериментальная установка.

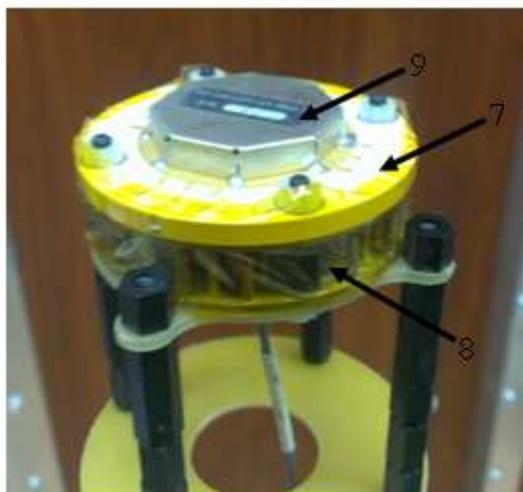


Рис.10. Антенный элемент.

Антенный элемент отдельно показан на рис. 10. Этот элемент представляет собой практически применяемую антенну, показанную в [2]. Эта антенна содержит печатную антенну 7, выполненную на подложке из керамики. Снизу расположена вторая антенна 8, названная антиантенной [9,10]. Благодаря наличию антиантенны, антенный элемент имеет ДН, близкую к кардиоиде. В

антиантенне для уменьшения веса использована подложка в виде искусственного диэлектрика [11]. Антенный элемент также содержит малошумящий усилитель 9.

Измерения проводились по горизонтальной поляризации относительно рис.9 (с вектором E , перпендикулярным к оси 5). На рис. 11,12 показана ДН антенного элемента, измеренная в свободном пространстве (кривые 1), а также расчетные (кривые 2) и экспериментальные (кривые 3) характеристики направленности установки с ребром. При этом, рис.11 соответствует полностью металлическому ребру, а рис.12 – ребру с полупрозрачным окончанием.

Из приведенных графиков видно, что расчетная модель достаточно хорошо описывает экспериментальные графики в области отсечки поля. Осцилляции в области глубокой тени обусловлены излучением нерабочего (дальнего) окончания ребра, как указывалось. Как видно из экспериментальных графиков, применение полупрозрачного ребра позволило получить отношение DU под углом 20 градусов порядка -20дБ, в то время как полностью металлическое ребро позволяет получить -7дБ, а антенный элемент в свободном пространстве имеет для указанного угла – 6дБ.

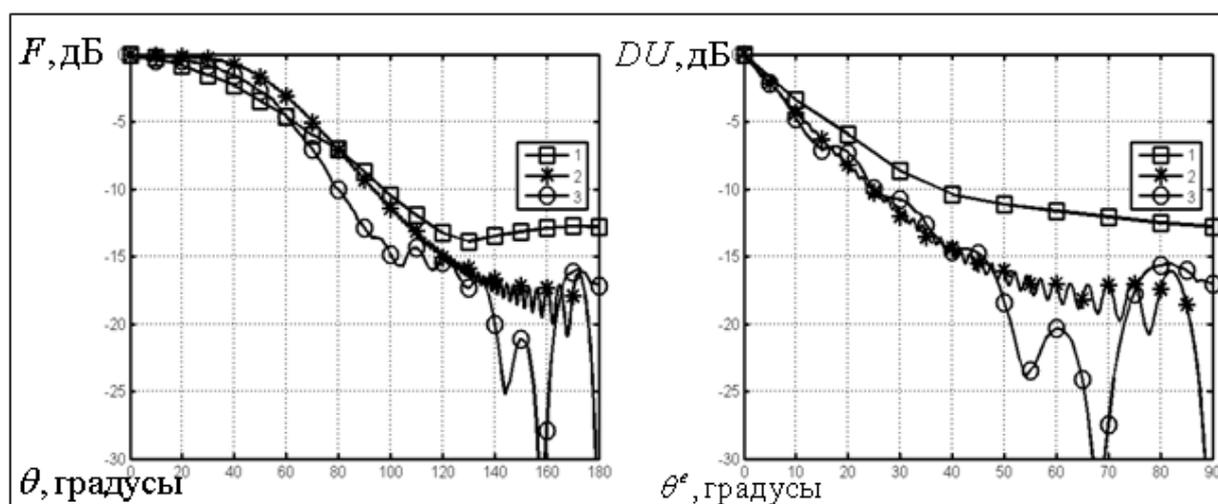


Рис. 11 Сравнение экспериментальных и расчетных данных, полностью металлическое ребро.

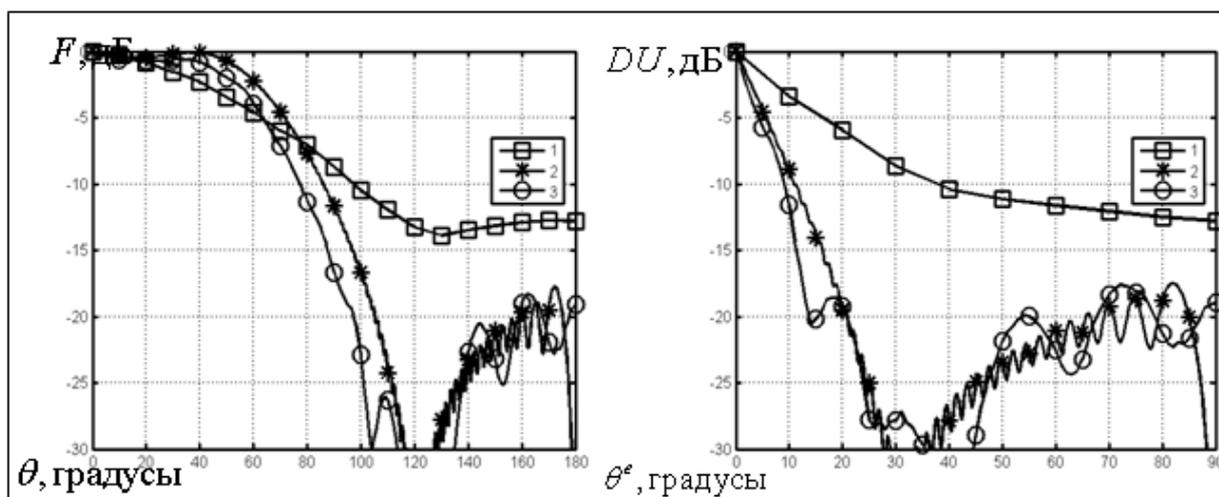


Рис. 12. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, ребро с полупрозрачным окончанием.

5. Заключение

Таким образом, дополнение основного экрана антенны ребрами с полупрозрачными окончаниями, параллельными направлению основного излучения, приводит к значительному улучшению крутизны отсечки поля при переходе в теневую область. При расстояниях до ребра порядка 2...3 длин волн отсечка поля достигает 20дБ под углами порядка 15...20 градусов к плоскости основного экрана.

Литература

1. А.В.Вейцель, В.А.Вейцель, Д.В.Татарников Аппаратура высокоточного позиционирования по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем: высокоточные антенны, специальные методы повышения точности позиционирования/ Под ред. М.И.Жодзижского, М.: МАИ-ПРИНТ, 2010 – 386с.,ил.
2. A.Leick, L.Rapoport, D.Tatarnikov GPS Satellite Surveying, 4-th Ed., Wiley, New York, 2015
3. Д.В.Татарников, И.М.Чернецкий Затенение полуплоскостью с полупрозрачным окончанием, Журнал Радиоэлектроники ИРЭ РАН, №12, 2012, стр. 1684-1719

4. В. А. Боровиков, К. А. Амбарцумова. Построение параболического зеркала с краем переменной прозрачности. Радиотехника и электроника, 1990, №12.
5. И.Ф.Будагян, Д.А.Хрычев, А.С.Узянов Моделирование распределения электромагнитного поля вблизи краевой части ребра и диаграмм направленности параболического зеркала с переменным импедансом, М.: Радиотехника, Антенны, №12(67), 2002
6. И.Ф.Будагян, Г.Г. Щукин Моделирование характеристик излучения зеркальных антенн с корректирующим переменным импедансом, М.: Радиотехника, Антенны, №12(91), 2004
7. Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями / под ред. Б. З. Каценеленбаума и А. Н. Сивова, Москва, Наука, 1989
8. Tretyakov S. Analytical Modeling in Applied Electromagnetics, Artech House, Norwood, 2003
9. I.Soutiaguine, D.Tatarnikov, A.Astakhov, V.Filippov, A.Stepanenko Antenna Structure for Reducing the Effects of Multipath Radio Signals, Patent US 6836247 B2, 2004
- 10.D.Tatarnikov, I.Soutiaguine, V.Fillipov, A.Astakhov, A.Stepanenko, P.Shamatulsky Multipath Mitigation by Conventional Antennas with Ground Planes and Passive Vertical Structures, GPS Solutions, 9(3), pp.194-201, 2005
- 11.Д.В.Татарников Пластинчатые антенны с подложками из искусственных диэлектриков Антенны, №1(128) М., Радиотехника, 2008, стр. 35-45