

УДК 621.396.67

РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ УКРЫТИЯ СО СВОЙСТВАМИ УГЛОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ

В. Н. Семененко, К. М. Басков, И. И. Краснолобов, Т. А. Фурманова, Д. И. Акимов
Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук,
125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Статья поступила в редакцию 19 апреля 2018 г., после доработки – 15 мая 2018 г.

Аннотация. В работе исследуются способы улучшения помехозащищенности параболических антенн с помощью радиопрозрачных укрытий со специальными свойствами угловой фильтрации поля излучения антенны. Рассматриваются различные конструкции укрытий, состоящие из угловых фильтров и бленды с поглощающим материалом, которые позволяют снижать дальнее боковое и заднее излучения антенны. В работе представлены как результаты экспериментальных исследований, так и результаты расчетов радиотехнических характеристик специальных радиопрозрачных укрытий. Рассмотрены достоинства и недостатки известной конструкции углового фильтра на основе четырёх решёток из проводов. Такой фильтр обладает сильными свойствами угловой фильтрации, но при изготовлении требуется выдерживать очень точные параметры его конструкции. Представлена эквивалентная схема для углового фильтра, состоящего из элементов с выраженными электрическими моментами, для электродинамического анализа его свойств. Элементами с выраженными электрическими моментами могут быть как вибраторы, так и спирали, диаметр которых много меньше, чем их длина, а размер спиралей должен быть много меньше, чем длина волны. Приведены результаты измерений и расчётов с помощью пакета программ FEKO коэффициентов пропускания углового фильтра из таких спиралей при разных углах падения. Приведены результаты измерений диаграмм направленности параболической антенны радиорелейной связи с блендой с радиопоглощающим материалом и двумя угловыми фильтрами из резонансных вибраторов и трёхслойной защитной диэлектрической стенкой. Показано, что применение угловых фильтров в составе бленды позволяет

существенно снизить уровень бокового и заднего излучения параболической антенны. При этом технология производства угловых фильтров достаточно проста и не требует при их изготовлении выдерживать большие точности.

Ключевые слова: параболическая антенна, бленда, угловой фильтр, боковое и заднее излучение, радиопрозрачное укрытие.

Abstract. The approaches to increase the noise protection level of parabolic antennas through inclusion of angular filters of antenna radiation into the radiotransparent radomes have been investigated in this paper. Various configurations of radomes with the antenna hood, having the absorbing material, and angular filters, which together allow reducing the rear and far lateral radiation of the antenna, are considered. The comparison of radomes' radio-technical characteristics, obtained experimentally and in numerical simulation, are presented. The advantages and shortcomings of the known angular filter construction, based on four grids of wires, have been examined. This filter is characterized by strong angular filtration capability, but its manufacturing requires very accurate tolerance holding. The angular filter with elements, having substantial electric moments, and its equivalent circuit analog for electrodynamic analysis of the filter's properties are presented. Vibrators and spirals of length much less than wavelength were used as elements with substantial electric moments. In case of spiral elements their diameter must be much less than length. Angular dependences of transmission coefficient of filter with spiral elements, calculated with software package FEKO and measured, are compared. The measured direction patterns of the parabolic antenna, which is used in radio-relay communication and has the hood with the absorbing material attached, two angular filters, made of resonant vibrators, and the three-layered protecting dielectric wall, are presented. Inclusion of angular filters into the hood is shown to considerably reduce the level of rear and lateral radiation of parabolic antenna. Furthermore, angular filter production technique is quite simple and doesn't require holding strict tolerance.

Key words: parabolic antenna, antenna hood, angular filter, rear and lateral radiation, radome.

1. Введение

Важной характеристикой антенн является уровень бокового и заднего излучения. Способов снижения бокового и заднего излучения зеркальных антенн в последние годы разработано достаточно много [1-6]. Суть всех известных методов снижения бокового и заднего излучения антенны заключается в формировании распределения поля с плавным спаданием к краю апертуры антенны, в устранении затекания тока на заднюю поверхность зеркала и в использовании экрана.

Зеркальные антенны с вынесенным облучателем обладают более высоким уровнем помехозащищенности по сравнению с осесимметричными антеннами [1]. В [2] приведены различные конструктивные решения для создания антенн с повышенной помехозащищённостью. В [3] предлагается делать края зеркала полупрозрачными, в [4,5] предлагается использовать полупрозрачный экран для снижения уровня заднего излучения, а также представлен метод расчёта оптимальной прозрачности экрана.

Одним из эффективных способов снижения бокового излучения готовой антенны является установка металлической бленды с нанесенным на её внутреннюю боковую поверхность радиопоглощающим материалом (РПМ). Для более глубокого подавления боковых лепестков ДН антенны можно использовать угловые фильтры (УФ), которые обладают высоким уровнем прозрачности при нормальном падении электромагнитной волны и высокой степенью экранирования при наклонном падении. Идея использования УФ для снижения уровня бокового излучения антенны была предложена в [6] и заключается в том, что пространственные гармоники поля, которые образуются вследствие несовершенства конструкции антенны, задерживаются угловым фильтром и поглощаются в РПМ на бленде (рис. 1). При этом основное излучение антенны проходит через фильтр без потерь.

В этой работе представлено исследование возможности снижения уровня боковых лепестков параболических антенн с помощью угловых фильтров разного типа. Исследование возможности снижения уровней бокового и

заднего излучений проводится с короткофокусной параболической антенной с линейной поляризацией в диапазоне частот 7,9...8,5 ГГц.

2.1. Угловой фильтр на основе решёток индуктивного типа из металлических проводов

Один из вариантов УФ описан в [7]. Фильтр состоит из четырёх последовательно расположенных решёток параллельных проводов (рис. 2). Периоды решёток и расстояние между ними подбираются таким образом, чтобы в заданном диапазоне частот отражённые от решёток поля компенсировали друг друга, а вся конструкция имеет частотное окно прозрачности. Так как при наклонном падении волны фазы прошедшего и отражённого полей изменяются, согласование между слоями исчезает и коэффициент пропускания (КП) всей конструкции резко падает.

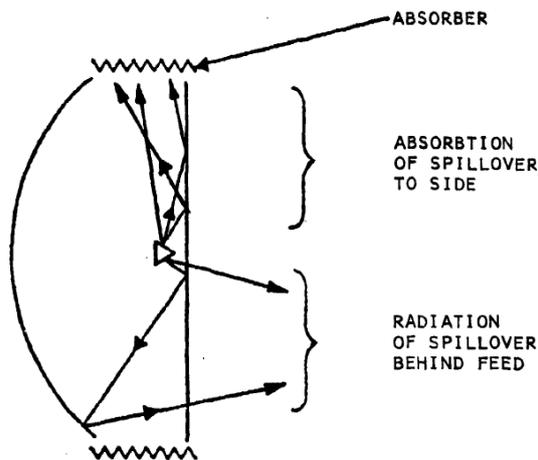


Рис. 1. Принцип работы УФ с блендой и РПМ.

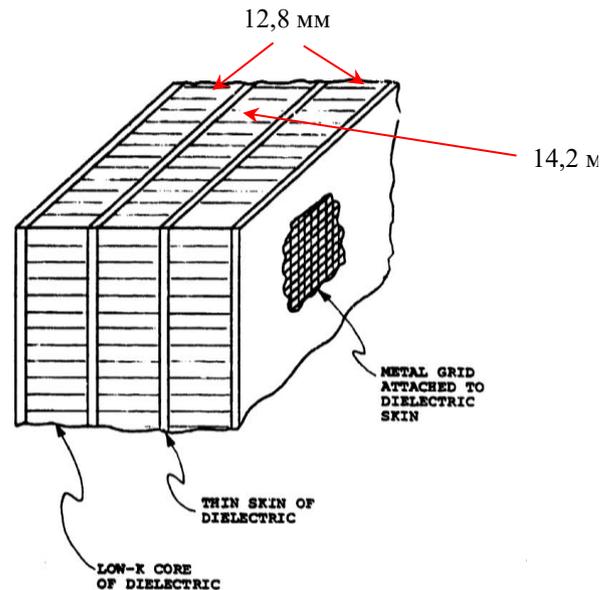


Рис. 2. Структура УФ, состоящего из четырех решёток из металлических проводов.

Для проверки приведенных в [7] результатов нами были проведены вычисления угловых и частотных зависимостей КП с использованием описанной в [8] модели. На рис. 3 показан результат расчета частотной зависимости КП УФ при нормальном падении волны. На рис.4 сплошными

линиями приведены угловые зависимости КП на частоте 9,5 ГГц. Для сравнения на рисунке штриховыми линиями приведены аналогичные зависимости из [7]. На рисунках видно, что результаты, полученные нами и авторами [7], хорошо совпадают и что фильтр обладает ярко выраженными свойствами угловой фильтрации электромагнитной волны.

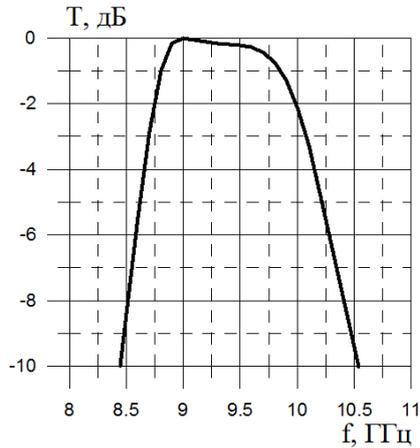


Рис. 3. Частотная зависимость КП УФ при нормальном падении волны на частоте 9,5 ГГц.

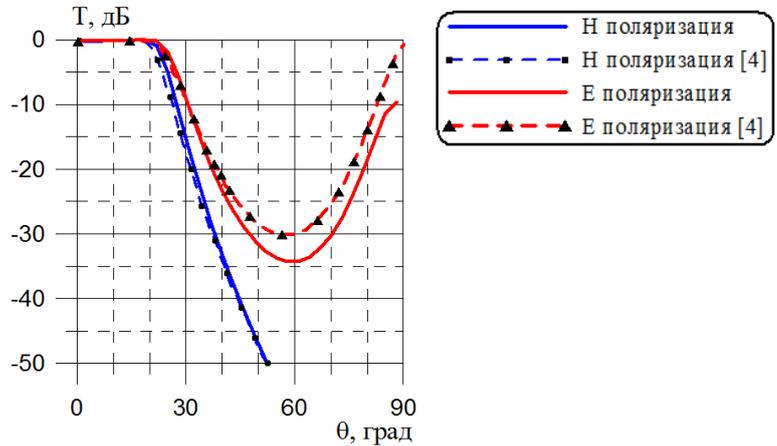


Рис. 4. Угловые зависимости КП УФ при Н и Е поляризациях падающей волны на частоте 9,5 ГГц.

Несмотря на сильные свойства угловой фильтрации УФ на основе решёток из проводов, у него есть существенные недостатки. Основной недостаток такого УФ заключается в том, что его характеристики неустойчивы при небольших изменениях параметров, в итоге при его производстве необходимо обеспечить высокую точность изготовления. Поэтому далее был рассмотрен другой вариант УФ на основе элементов с выраженным электрическим моментом, который обладает более устойчивыми радиотехническими характеристиками к погрешностям в его параметрах.

2.2. Угловые фильтры на основе решёток из вертикальных металлических штырей

Рассмотрим УФ из элементов с выраженным электрическим моментом на линейной поляризации. Такими элементами могут быть тонкие вибраторы. Для

того, чтобы уменьшить размер вибраторов при сохранении их резонансной частоты, вместо вибраторов можно использовать объёмные спирали, диаметр которых много меньше их длины и много меньше длины волны. Если вибраторы установить перпендикулярно плоскости решётки, то такая структура будет возбуждаться электромагнитным полем только наклонном падении волны при Е поляризации. На рис. 5 представлено изображение элементов с выраженным электрическим моментом, выполненных в виде объёмных спиралей.

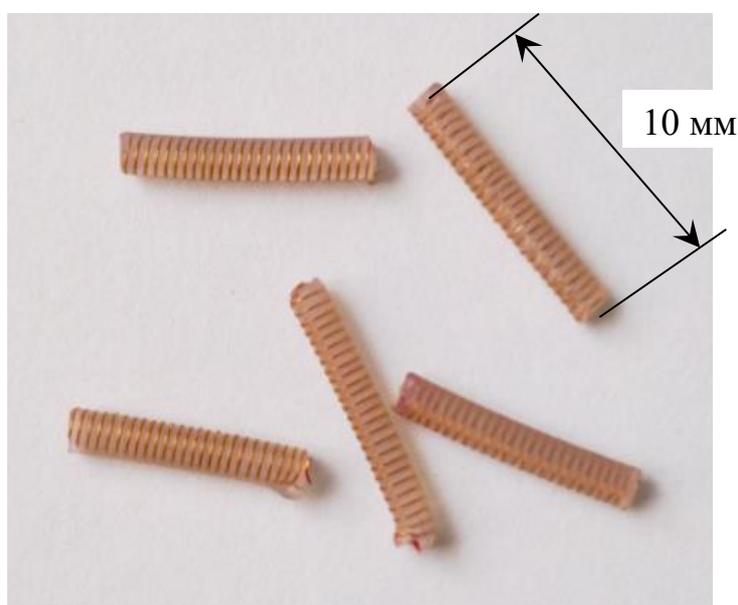
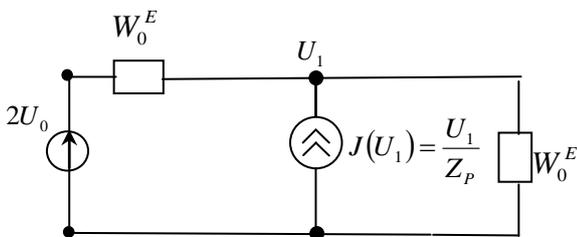


Рис. 5. Спирали диаметром 1,4 мм из 21 витка медной проволоки на диэлектрическом стержне.

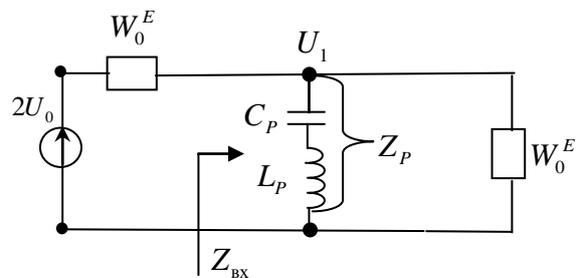
Для предварительного анализа периодических решёток часто используют эквивалентную схему, в которой решётка представляется в виде некоторого фильтра из сосредоточенных реактивных элементов. При решении задачи дифракции электромагнитной волны на периодической решётке токи на элементах решётки представляются в эквивалентной схеме в виде источника тока J , управляемого напряжением U_1 [9], как показано на рис. 6а. Сопротивление W_0^E – волновое сопротивление свободного пространства при Е поляризации падающей волны. Величина источника тока J на рис. 6а

выражается через преобразование Фурье по пространственным частотам (χ_1, χ_2) от токов на элементах решётки I_x . Напряжение U_1 выражается через преобразование Фурье по пространственным частотам от касательных составляющих полного поля на элементах решётки E_x . Величина $Z_p = \frac{E_x}{I_x}$ — является эквивалентным сопротивлением решётки. Схема на рис. 6а для решётки из вибраторов, лежащих в её плоскости (далее плоская решётка из вибраторов), эквивалентна схеме на рис. 6б, где вместо источника тока включается реактивное сопротивление Z_p , которое является последовательным сопротивлением некоторой ёмкости и индуктивности. Значения эквивалентной ёмкости и индуктивности зависят от формы элементов и плотности их установки в решётке. Использование вместо вибраторов объёмных спиралей приводит к увеличению значения L_p . Пользуясь схемой на рис. 6б, КП и коэффициент отражения (КО) решётки из вибраторов можно вычислить по формулам:

$$T = \frac{U_1}{U_0}, R = \frac{Z_{\text{вх}} - W_0^E}{Z_{\text{вх}} + W_0^E} \quad (1)$$



а) схема с источником тока.



б) схема с эквивалентным сопротивлением.

Рис. 6. Эквивалентные схемы решётки из вибраторов.

Если вибраторы устанавливаются перпендикулярно плоскости решётки (далее – вертикально установленные вибраторы), то токи на элементах в эквивалентной схеме в случае E поляризации падающей волны, согласно [9], представляются в виде источника напряжения U , управляемого током J_1 , как

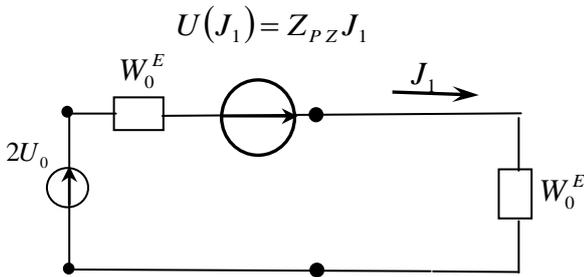
показано на рис. 7. Величину источника напряжения можно определить по формуле:

$$U = \frac{j}{\omega \varepsilon_0} I_z, \quad (2)$$

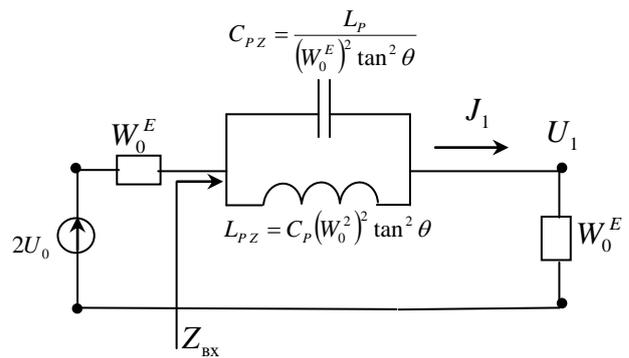
где I_z – преобразование Фурье по пространственным частотам от токов на вертикально установленных вибраторах;

ω – круговая частота падающей волны;

ε – диэлектрическая проницаемость свободного пространства.



а) схема с источником напряжения.



б) схема с эквивалентным сопротивлением.

Рис. 7. Эквивалентные схемы решётки из вертикально установленных вибраторов.

Ток J_1 определяется по формуле:

$$J_1 = \frac{\omega \varepsilon_0}{j|\chi|^2} E_z, \quad (3)$$

где E_z – преобразование Фурье по пространственным частотам (χ_1, χ_2) от касательных к элементам решётки составляющих полного электрического поля;

$$|\chi|^2 = \chi_1^2 + \chi_2^2 = k_0^2 \sin^2 \theta;$$

k_0 – постоянная распространения волны;

θ – угол падения волны.

В итоге, эквивалентное сопротивление решётки из вертикально установленных вибраторов выражается по формуле:

$$Z_{PZ} = -\frac{|\chi|^2}{(\omega \varepsilon_0)^2} \frac{I_Z}{E_Z} \quad (4)$$

Если элементы плоской решётки из вибраторов и решётки из вертикально установленных вибраторов одинаковы и периоды этих решёток равны, то приблизительно можно считать, что $\frac{E_Z}{I_Z} = \frac{E_X}{I_X} = Z_P$. Эквивалентное сопротивление

решётки из вертикальных вибраторов, с учётом того, что $(W_0^E)^2 = \frac{k_0^2}{(\omega \varepsilon_0)^2} \cos^2 \theta$,

можно определить по формуле:

$$Z_{PZ} = -\frac{(W_0^E)^2}{Z_P} \tan^2 \theta \quad (5)$$

Эквивалентная схема для расчёта КП и КО по формуле (1) решётки из вертикально установленных вибраторов представлена на рис. 7б. В схеме решётка моделируется параллельным контуром из ёмкости и индуктивности, величины которых зависят от угла падения волны.

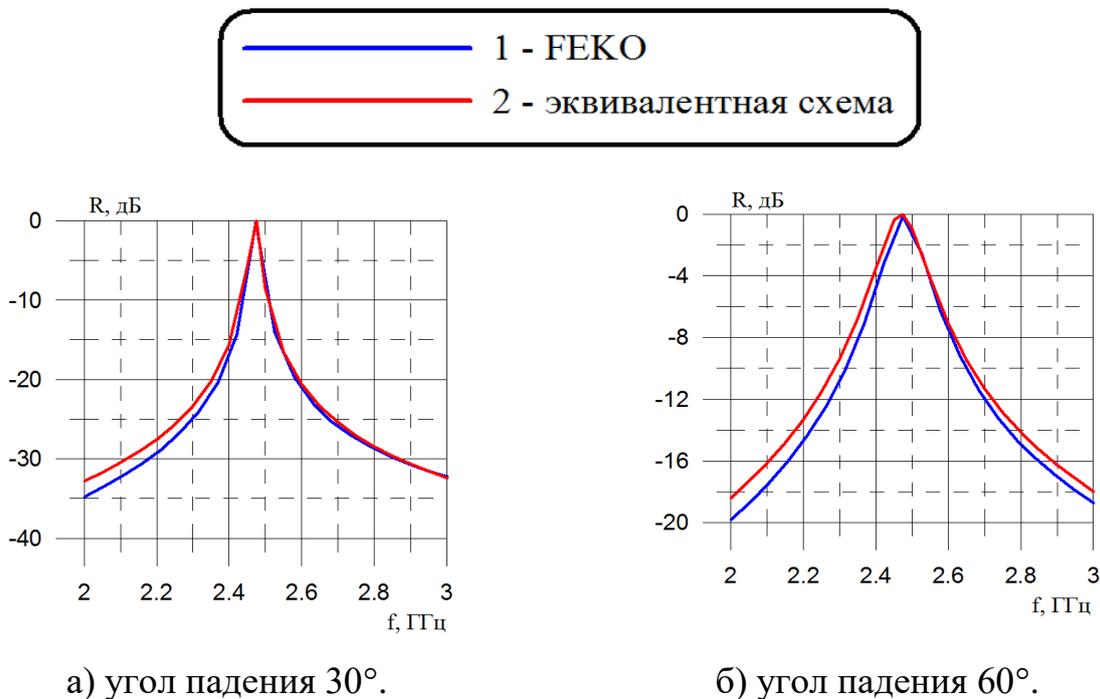


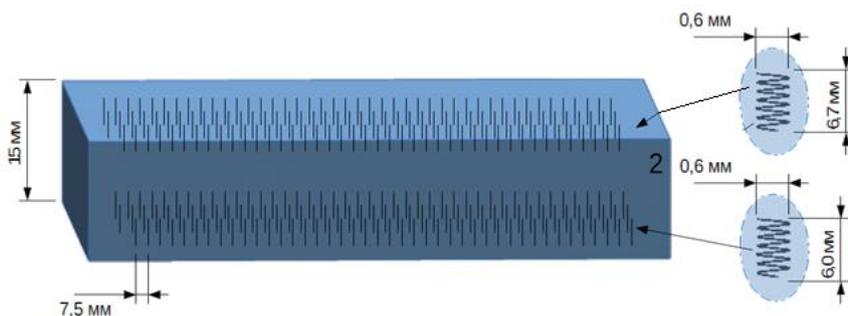
Рис. 8. Частотные зависимости КО решётки с периодом 20×20 мм из вертикальных спиралей при падении под разными углами E поляризованной волны.

На рис. 8 представлены вычисленные частотные зависимости КО решётки с периодом 20×20 мм из вертикальных спиралей, изображённых на рис. 5. Вычисления проводились как методом поверхностных интегральных уравнений с помощью пакета программ электродинамического моделирования FEKO, так и по эквивалентной схеме. Из хорошего совпадения расчётов, выполненных двумя способами, можно сделать вывод, что эквивалентные параметры решётки в схеме на рис. 6б не зависят от частоты и угла падения волны. Следует отметить, что использовать эквивалентную схему для расчёта электродинамических параметров решёток из вертикально установленных элементов можно только тогда, когда длина элементов много меньше длины волны.

При уменьшении угла падения волны полоса частот, где решётка из вертикально установленных спиралей сильно отражает, сужается, и при нормальном падении волны решётка становится абсолютно прозрачной. Также решётка из вертикальных спиралей остаётся прозрачной при падении на неё Н поляризованной волны.

Используя эквивалентные параметры решётки, можно составить длинную линию эквивалентную УФ, состоящего из нескольких решёток из вертикальных спиралей, и определить его электродинамические свойства.

На рис. 9 представлены измеренные и рассчитанные с помощью FEKO частотные зависимости КП УФ, структура которого показана на рис. 9а. Измерения проводились на измерительном стенде для измерений S-параметров плоских образцов материалов в широкой полосе частот по методике измерений, которая более подробно описана в [10].



а) структура УФ.

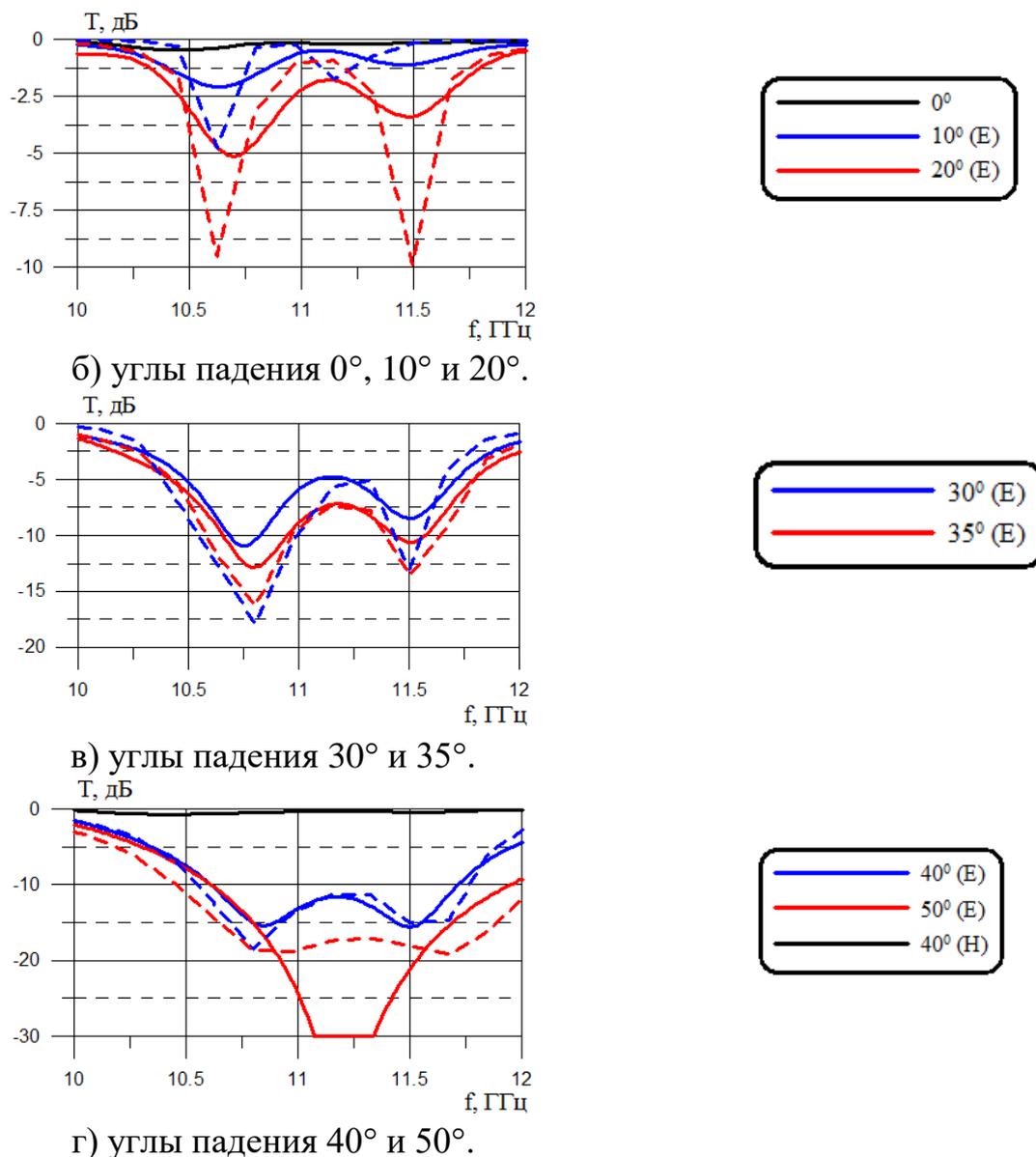


Рис. 9. Структура УФ из двух решёток из вертикальных спиралей (а) и его частотные зависимости КП (б, в, г) при разных углах падения электромагнитной волны (сплошные линии – измерения; пунктирные линии – расчёт).

УФ состоит из двух решёток с периодами $7,5 \times 7,5$ мм из спиралей с длинами 6,0 и 6,7 мм, установленных вертикально в пенопласте. Для расширения рабочей полосы частот одна решётка настроена на частоту 10,7 ГГц, а другая на частоту 10,5 ГГц. Из графиков на рис. 9 б, в и г видно, что УФ при Е поляризации падающей волны обладает сильными фильтрующими свойствами в полосе частот от 10,5 до 11,5 ГГц. При нормальном падении

волны и при Н поляризации УФ является практически прозрачным. Для расширения рабочей полосы частот УФ периоды решёток необходимо уменьшить, т.е. увеличить плотность установки спиралей.

3. Радиопрозрачное укрытие со свойствами угловой фильтрации электромагнитной волны

С учетом проведённого исследования УФ был разработан вариант РПУ, которое улучшает радиотехнические характеристики параболической антенны, представленной на рис. 10а.



а) Внешний вид параболической антенны.



б) Параболическая антенна с блендой с РПМ, без фильтров.

Рис. 10. Внешний вид параболической антенны для радиорелейной связи.

На рис. 11 представлена структура такого РПУ, в котором используются два УФ и один поляризационный фильтр. РПУ состоит из металлической бленды глубиной 250 мм с нанесенным на её внутреннюю боковую поверхность РПМ РАН-28М, который представляет собой листовой РПМ толщиной 20 мм, получаемый путём пропитки эластичного открытопористого пенополиуретана электропроводящим составом. КО при нормальном падении волны такого РПМ в диапазоне частот 4...40 ГГц не превышает минус 15 дБ. Зазор между антенной и блендой заполняется специальным радиопоглощающим герметиком для снижения вредного излучения в заднюю полусферу.

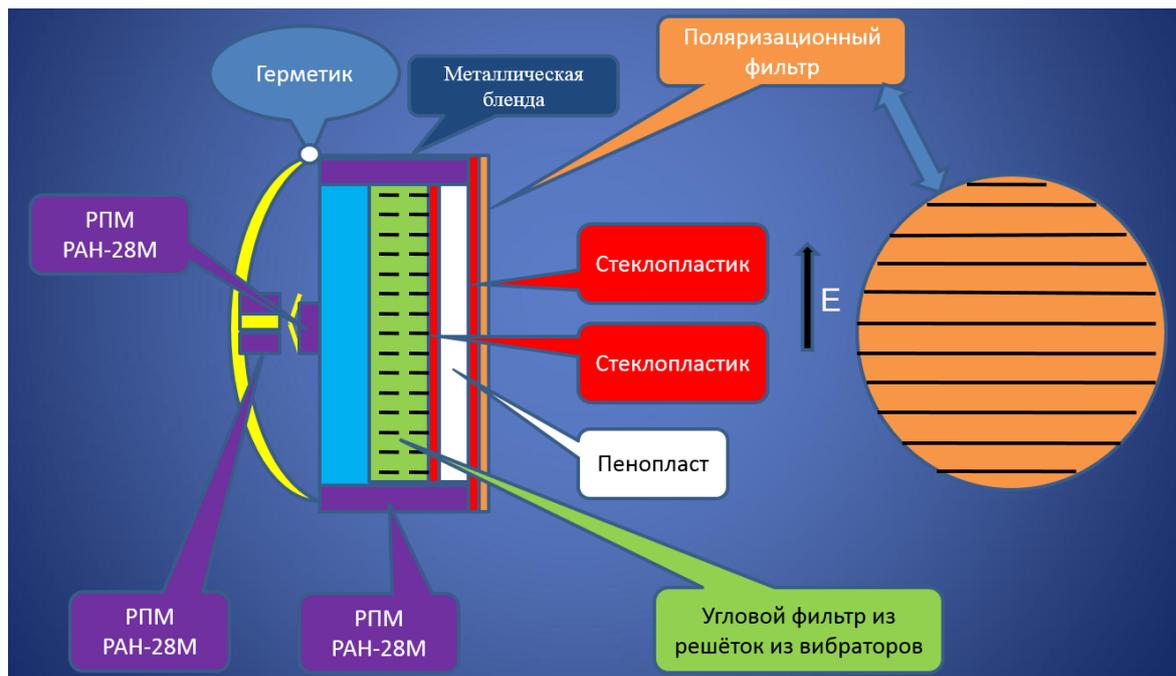


Рис. 11. Схема радиопрозрачного укрытия, корректирующего ДН параболической антенны.

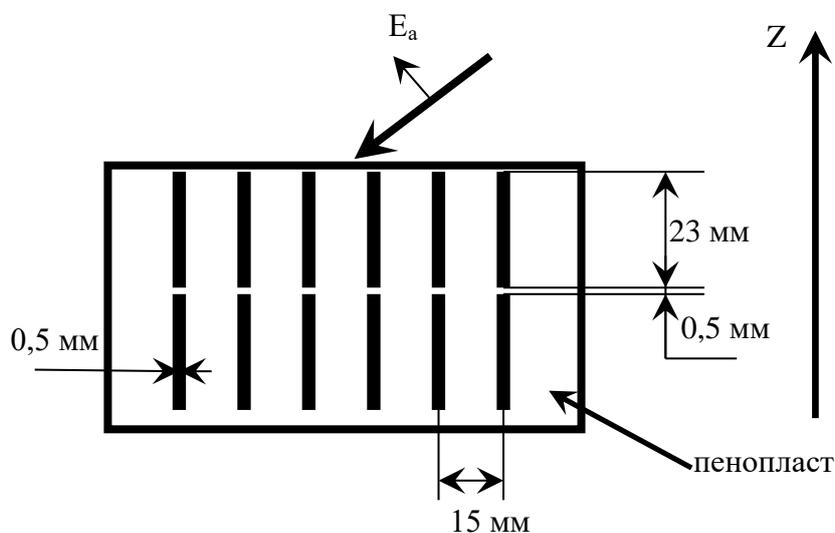


Рис. 12. Схема УФ из двух решеток вибраторов.

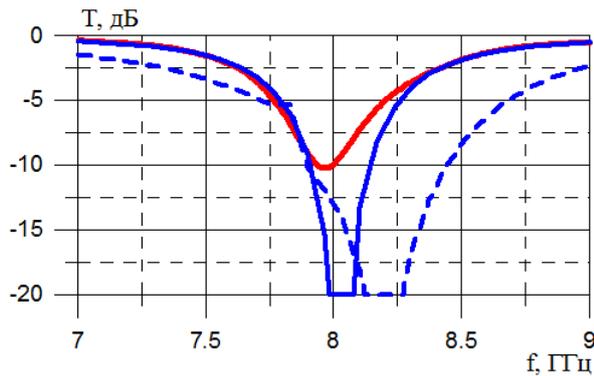
В состав РПУ входят три фильтра:

1) УФ при E поляризации падающей волны на основе двух решеток с периодом 15 мм из вертикально установленных вибраторов длиной 23 мм (рис. 12);

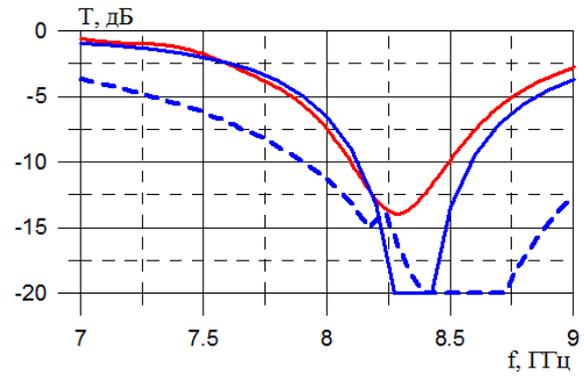
2) УФ при H поляризации падающей волны, состоящий из двух слоев диэлектрика с диэлектрической проницаемостью равной 5,0 и толщиной 2,3 мм,

между которыми расположен один слой пенопласта с диэлектрической проницаемостью близкой к 1,0 и толщиной 21,5 мм;

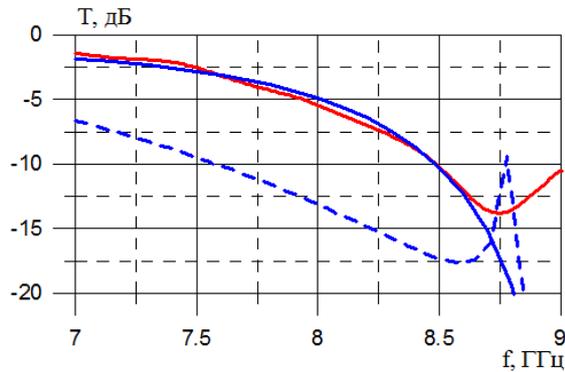
3) поляризационный фильтр, состоящий из решётки тонких медных проводов с периодом 2,0 мм. Использование в составе РПУ УФ из вертикальных вибраторов, а не спиралей, связано с тем, что решётку большой площади из спиралей без специального оборудования выполнить сложно.



а) угол падения 30°.



б) угол падения 40°.



в) угол падения 50°.

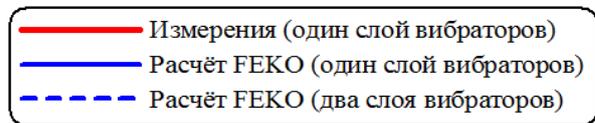


Рис. 13. Измеренные и рассчитанные частотные зависимости КП УФ из одного и двух слоёв вертикальных вибраторов

На рис. 13 представлены вычисленные и измеренные частотные зависимости КП решётки из вертикально установленных вибраторов для Е поляризованной волны при разных углах падения. Расчёт проводился для одной решётки из вертикально установленных вибраторов и для двух таких же решёток, установленных, как показано на рис. 12. Измерения проводились на

измерительном стенде для измерений S-параметров плоских образцов. Расчёт проводился с помощью пакета программ FEKO. Можно заметить, что УФ из одного слоя вибраторов обладает низким уровнем угловой фильтрации. Для улучшения фильтрующих свойств УФ необходимо использовать два слоя решётки. Кроме этого, видно, что резонансная частота решёток из вибраторов изменяется с изменением угла падения волны, что снижает их фильтрующие свойства.

Стенка РПУ трёхслойной конструкции обладает свойством угловой фильтрации при Н поляризации падающей волны, если толщина слоя пенопласта составляет приблизительно половину длины волны. Кроме этого, такая стенка защищает антенну от внешних воздействующих атмосферных факторов.

Необходимость использования поляризационного фильтра обусловлена тем, что УФ из вибраторов сильно увеличивает уровень излучения антенны на кроссовой поляризации. Вполне возможно, что УФ, выполненный из спиралей, в меньшей степени будет увеличивать уровень кроссполяризационной составляющей поля антенны.

Измерения ДН исследуемой антенны (рис. 10) проводились в её исходном виде и при установке на неё разработанного РПУ. В исходном виде антенна имела бленду глубиной 120 мм с РПМ. Апертура антенны закрывалась диэлектрическим листом с проницаемостью 5,0 и толщиной 2,3 мм. На рис. 14 представлены угловые зависимости КП листа диэлектрика, которым закрывалась антенна в исходном виде, трёхслойной стенки разработанного РПУ и полуволнового слоя диэлектрика толщиной 8,0 мм в рабочем диапазоне частот антенны. Можно заметить, что использование трехслойной конструкции стенки РПУ позволяет не только повысить КП в нужном диапазоне частот, но и получить УФ с хорошими свойствами угловой фильтрации. Полуволновая стенка РПУ, хотя и обладает высоким уровнем прозрачности в рабочем диапазоне частот антенны, но свойства угловой фильтрации электромагнитной волны у полуволновой стенки нет.

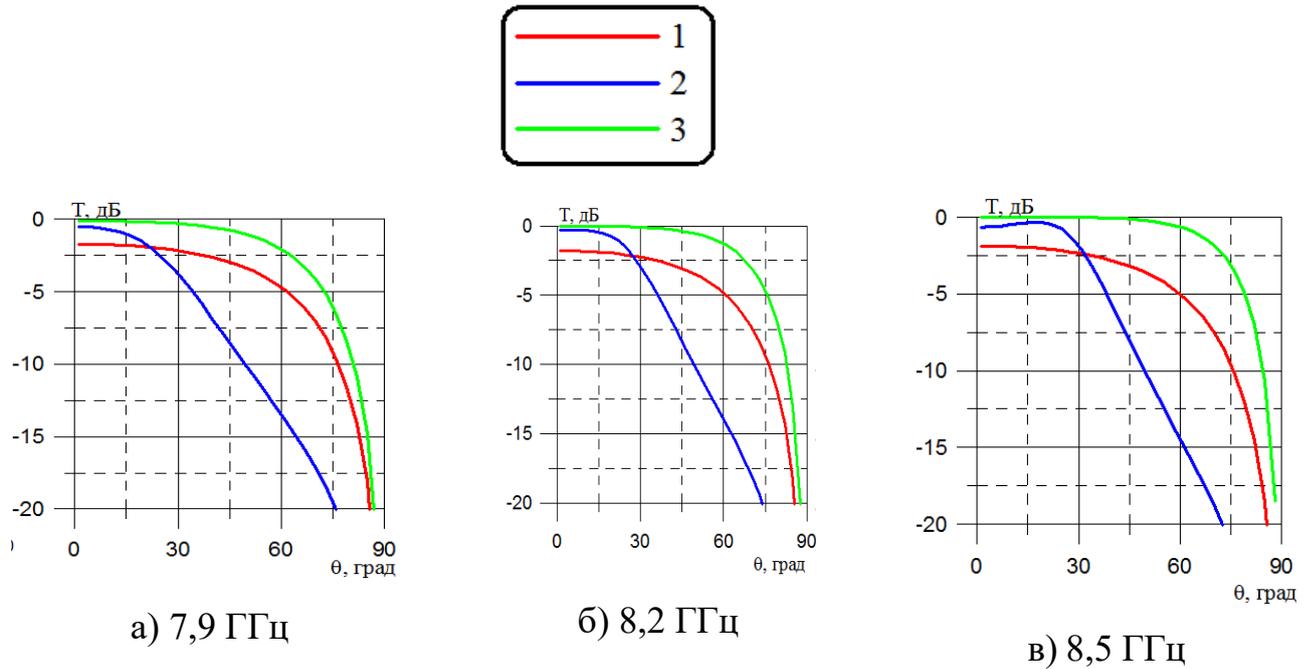


Рис. 14. Вычисленные угловые зависимости КП на трёх частотах рабочего диапазона (1 – один слой диэлектрика толщиной 2,3 мм; 2 – трёхслойная стенка РПУ; 3 – один слой диэлектрика толщиной 8,0 мм).

Измерения ДН параболической антенны проводились на трех частотах (7,9; 8,2 и 8,5 ГГц) её рабочего диапазона в двух основных плоскостях. На рис.15 и 16 представлены ДН в Е и Н плоскостях антенны на центральной частоте рабочего диапазона. Снижение бокового излучения антенны наблюдается уже с угла 25^0 в Е и Н плоскостях как в передней, так и в задней полусферах. Уровень снижения бокового излучения антенны достигает 20 дБ. Уровень заднего излучения параболической антенны снижается на 20 дБ за счёт применения РПУ. Одинаково высокая эффективность РПУ наблюдается во всём рабочем диапазоне частот.

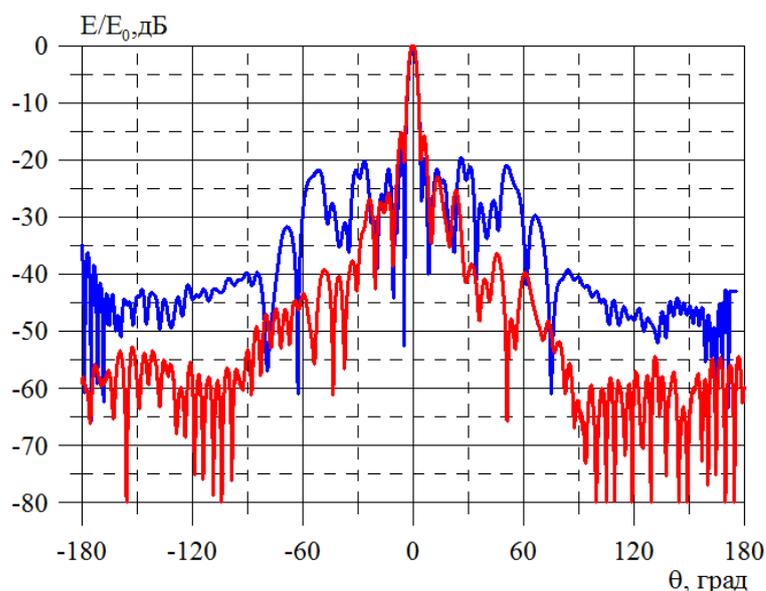


Рис. 15. ДН в Е плоскости параболической антенны в исходном виде (синяя кривая) и с РПУ (красная кривая) на частоте 8,2 ГГц.

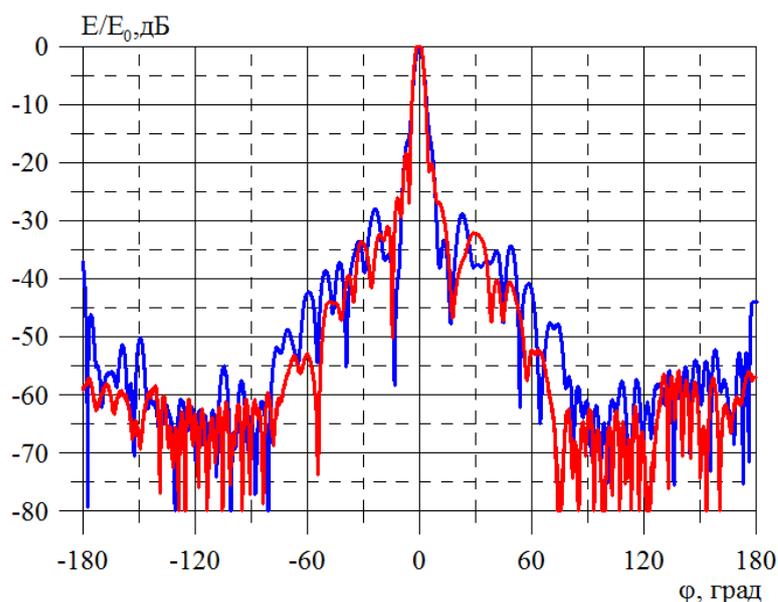


Рис. 16. ДН в Н плоскости параболической антенны в исходном виде (синяя кривая) и с РПУ (красная кривая) на частоте 8,2 ГГц.

На рис. 17 и 18 представлены измеренные ДН в Е и Н плоскостях для кроссовой поляризации антенны на частоте 8,5 ГГц, где наблюдается максимальный уровень кроссполяризованной составляющей поля излучения антенны в исходном виде. Здесь также видно существенное снижение уровня кроссполяризованного излучения при использовании разработанного РПУ.

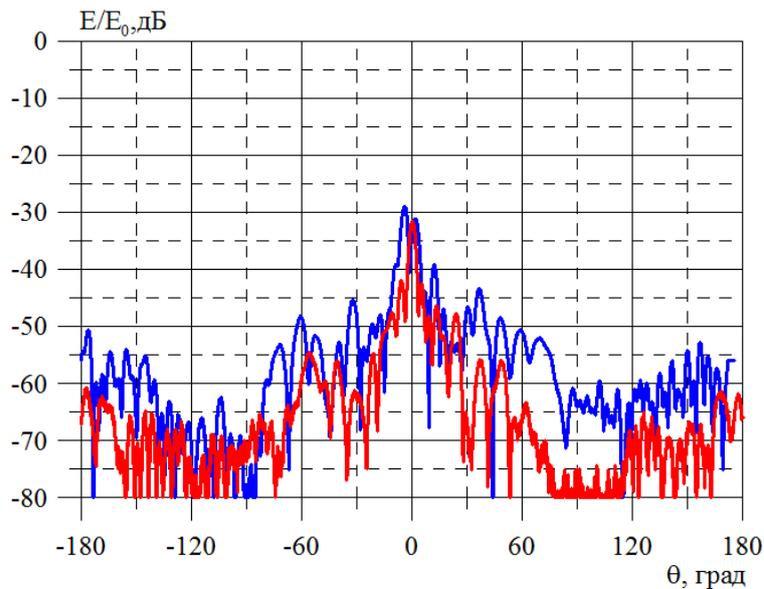


Рис. 17. Кроссполяризация ДН в Е плоскости параболической антенны в исходном виде (синяя кривая) и с РПУ (красная кривая) на частоте 8,5 ГГц.

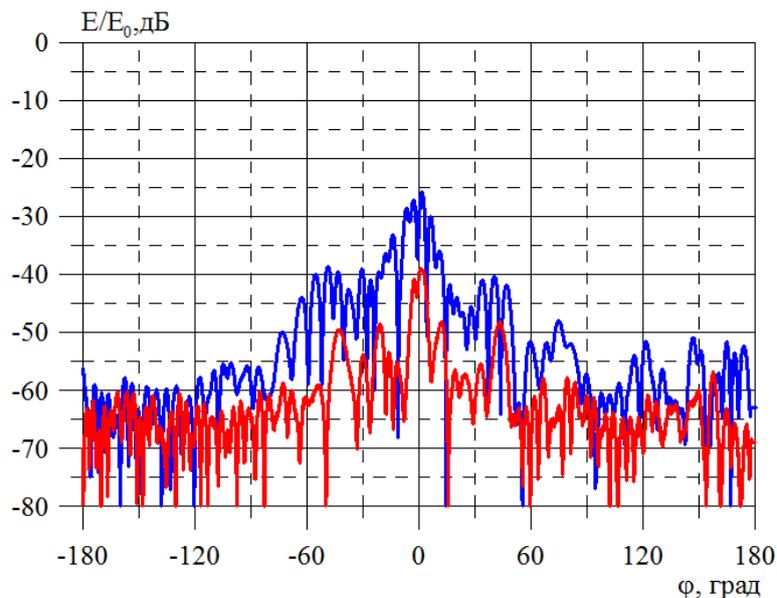


Рис. 18. Кроссполяризация ДН в Н плоскости параболической антенны в исходном виде (синяя кривая) и с РПУ (красная кривая) на частоте 8,5 ГГц.

Чтобы проверить эффективность УФ из вертикально установленных вибраторов проведены измерения ДН параболической антенны с разработанным РПУ в случае, когда в РПУ установлен УФ и когда УФ удалён из РПУ (рис. 19 – 20). Измерения проведены в Е плоскости для крайних частот рабочего

диапазона. Можно увидеть, что УФ позволяет добиться дополнительного снижения бокового излучения на 5...10 дБ. Особенно важно, что при использовании УФ сильно снижается уровень заднего лепестка – на 10 дБ.

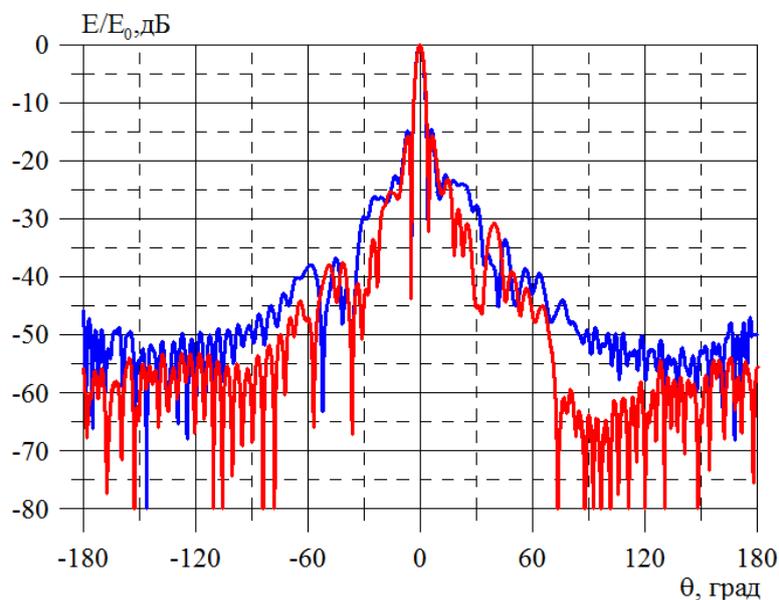


Рис. 19. ДН в Е плоскости параболической антенны с РПУ с УФ из вертикальных вибраторов (красная кривая) и без него (синяя кривая) на частоте 7,9 ГГц.

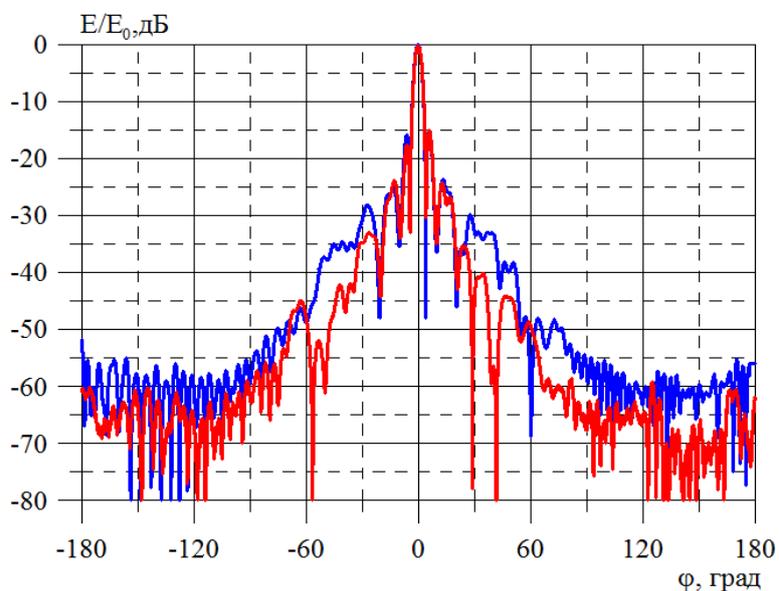


Рис. 20. ДН в Е плоскости параболической антенны с РПУ с УФ из вертикальных вибраторов (красная кривая) и без него (синяя кривая) на частоте 8,5 ГГц.

Некоторые фирмы выпускают антенны с блендой, но из-за экономии не используют РПМ. Для проверки необходимости использования РПМ внутри бленды проведены измерения ДН для центральной частоты рабочего диапазона исследуемой антенны в Н плоскости (рис. 21). Измерения проведены для двух комплектаций антенны: 1) антенна в исходном виде без бленды, как показано на рис. 10а; 2) на антенну устанавливается бленда глубиной 250 мм, как показано на рис. 10б, но без РПМ. Наличие бленды без РПМ не только не снижает боковое излучение, но даже приводит к локальному увеличению уровня боковых лепестков ДН. Пространственные гармоники ближнего поля антенны, с которыми связано увеличение уровня боковых лепестков ДН, отражаются от металлической стенки бленды и поднимают уровень бокового излучения в зеркальном направлении (рис. 22).

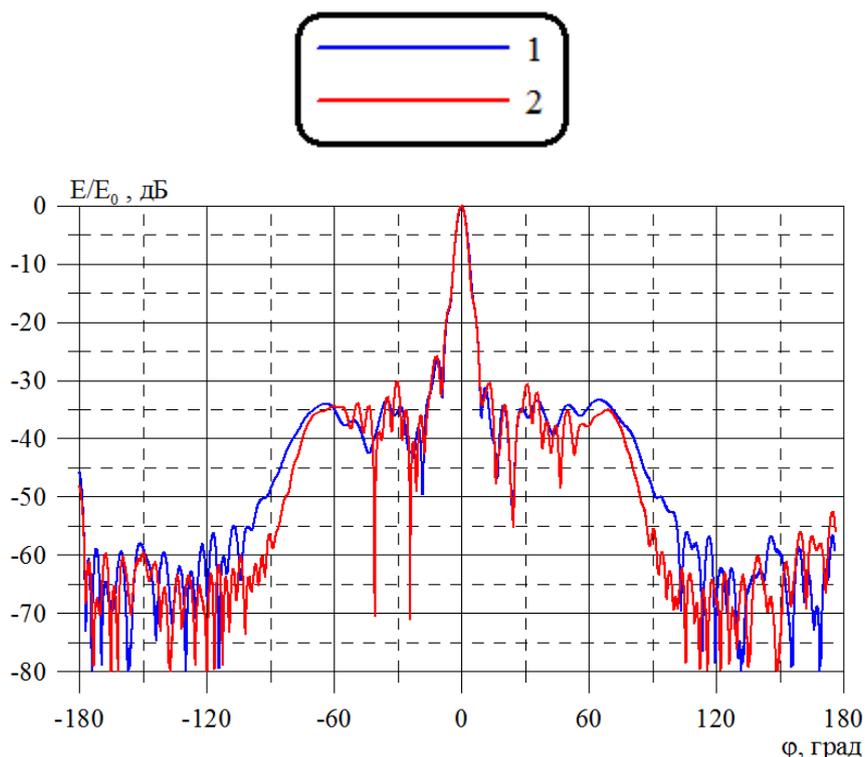


Рис. 21. ДН в Н плоскости параболической антенны на частоте 8,2 ГГц в комплектациях: 1 – антенна без бленды; 2 – антенна с металлической блендой глубиной 250 мм без РПМ.

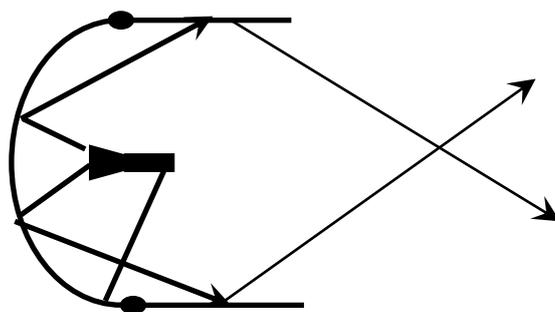


Рис. 22. Отражение пространственных гармоник ближнего поля антенны от металлических стенок бленды без поглощающего материала.

4. Заключение

Проведены исследования электродинамических свойств углового фильтра (УФ), состоящего из решеток элементов с ярко выраженным электрическим моментом (вибраторов или объёмных спиралей с малым диаметром по отношению к их длине и к длине волны), которые устанавливаются перпендикулярно плоскости фильтра. Такой УФ является практически прозрачным при нормальном падении волны и при падении Н поляризованной волны. При падении Е поляризованной волны УФ в области резонансной частоты обладает сильными фильтрующими по углу падения волны свойствами. Предложена эквивалентная схема УФ на основе сосредоточенных элементов, с помощью которой можно определить у УФ, состоящего из нескольких решёток, такие радиотехнические характеристики, как коэффициент пропускания и коэффициент отражения при любом угле падения волны.

Результаты численных и экспериментальных исследований подтвердили возможность реализации РПУ, состоящего из бленды и УФ, позволяющего снизить уровень бокового излучения антенны с блендой без УФ в среднем на 10...15 дБ, а у антенны без бленды на 15...20 дБ.

Литература

1. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства // Уч. пособие, Москва, Изд-во МИЭТ, 2005, – 80 с.

2. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС // Москва, Изд-во «Радио и связь», 1983, – 272 с.

3. Боровиков В.А., Амбарцумова К.А. Построение параболического зеркала с краем переменной прозрачности. // Радиотехника и электроника, 1990, №12.

4. Vadim Kaloshin, Kirill Klionovski Radiation of a dipole located on axis of a semitransparent disk, *Zhurnal Radioelektroniki - Journal of Radio Electronics*, 2014, No. 5, Available at <http://jre.cplire.ru/jre/may14/10/text.pdf>.

5. Калошин В.А., Клионовски К.К. Об излучении слабонаправленных осесимметричных антенн с круглыми экранами, РЭ, 2015, Т.60. №10.С.1015 - 1024.

6. Schell A. C. et al. Metallic Grating Spatial Filter for Directional Beamforming Antenna. Allan C. Schell, Winchester; Robert J. Mailloux, Wayland, both of Mass. Sep. 25, 1979. Apr. 19, 1976. US4169268.

7. John F. Pedersen, Peter W. Hannan. Design, fabrication and test of a metal-grid angular filter. *www.researchgate.net* ResearchGate GmbH. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235050575_Design_Fabrication_and_Test_of_a_Metal-Grid_Angular_Filter.

8. Басков К.М. Современное электродинамическое сопровождение проектирования и изготовления систем антенна – радиопрозрачное укрытие (Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук) // 05.12.07 – Москва, 2016. – 191 с.

9. Бодров В.В., Сурков В.И. Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. // Москва, Изд-во МЭИ, 1994, – 96 с.

10. Басков К.М., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // «Журнал радиоэлектроники». 2017. № 5, – 27 с. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/7/text.pdf>

Для цитирования:

В. Н. Семененко, К. М. Басков, И. И. Краснолобов, Т. А. Фурманова, Д. И. Акимов. Радиопрозрачные укрытия со свойствами угловой фильтрации для параболической зеркальной антенны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may18/7/text.pdf>, DOI 10.30898/1684-1719.2018.5.7