

Экспериментальное исследование ТЕМ-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением

А.М. Бобрешов, П.А. Кретов, Н.С. Сбитнев, Г.К. Усков

Воронежский государственный университет
394006, Российская Федерация, г. Воронеж
Университетская пл., 1

Предложен метод улучшения характеристик направленности и согласования ТЕМ-рупорной антенны с линейным раскрывом путем заполнения ее внутреннего пространства неоднородной диэлектрической средой. Вид закона пространственного распределения ее диэлектрической проницаемости выбирался из предположения о прямолинейном распространении волнового фронта из фазового центра. Из закона Лихтенеккера для вспененных материалов получена аппроксимация плавного заполнения при помощи сложной пространственной конфигурации сплошного диэлектрика с постоянной проницаемостью. Показана возможность натурального изготовления такого заполнения при помощи технологий 3D-печати и проведены экспериментальные измерения характеристик рупорной антенны.

Ключевые слова: ТЕМ-рупор, неоднородное диэлектрическое заполнение, характеристики направленности, согласование, линейный раскрыв.

Введение

ТЕМ-рупоры получили широкое распространение, как одна из основных составляющих систем сверхширокополосных (СШП) радиосистем. В первую очередь, это вызвано простотой конструкции таких антенн и удовлетворительными характеристиками направленности и согласования. Известны некоторые общие способы улучшения этих характеристик: изменение формы и угла раскрыва антенны [1–6]. В этих работах основной акцент делается на уменьшение нижней граничной частоты антенны. Однако, известны факторы, ограничивающий частотный диапазон сверху, главным из которых является несинфазность излучения в плоскости раскрыва антенны, приводящий к искажению диаграммы направленности. Частично данную проблему решает использование диэлектрических линз, помещаемых между лепестками рупора [4; 5].

Данная работа посвящена решению проблемы искажения диаграммы направленности и расширения диапазона рабочих частот ТЕМ-рупора. Предлагаемый метод заключается в создании искусственного материала с диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в зависимости от направления распространения электромагнитной волны в пространстве между лепестками антенны.

1. Аналитическое выражение для диэлектрической проницаемости заполняющей структуры

Варьирование диэлектрической проницаемостью ϵ позволяет предотвратить распад диаграммы направленности в верхнем частотном диапазоне за счет выравнивания волнового фронта, распространяющийся между лепестками антенны. В целом, данная идея базируется на предположении о существовании точечного фазового центра, в котором возбуждается электромагнитная волна. Диэлектрическая проницаемость среды выбирается так, чтобы обеспечить одинаковое время прихода электромагнитной волны к плоскости раскрыва ТЕМ-рупора.

Опуская подробный вывод выражения для распределения ϵ в зависимости от угла распространения луча, можем воспользоваться выражением, полученным в работе [7], которое наиболее просто выглядит для случая равенства длины и ширины раскрыва антенны:

$$\epsilon(\varphi) = \epsilon_{\max} \cos^2(\varphi), \quad (1)$$

где φ – угол отклонения луча от главного направления излучения, а ϵ_{\max} – наибольшая диэлектрическая проницаемость, достигаемая в главном направлении.

Если же раскрыв рупора не является квадратным, как представлено на рис. 1, то выражение

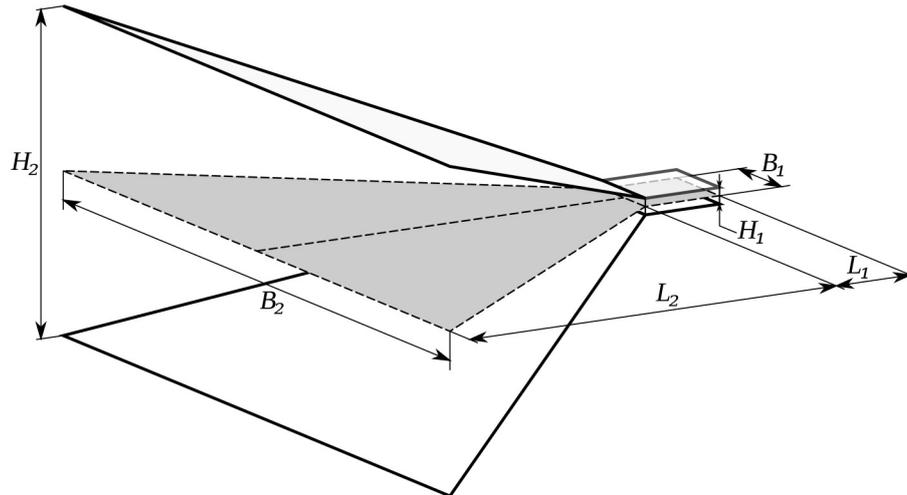


Рис. 1. Внешний вид и геометрические размеры ТЕМ-рупора

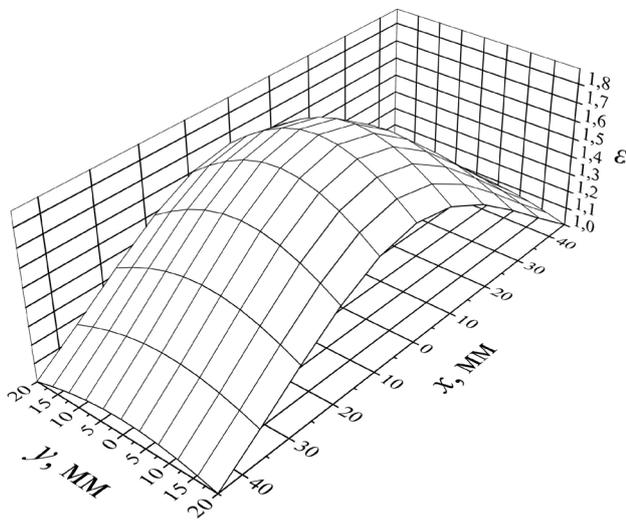


Рис. 2. Распределение диэлектрической проницаемости ϵ для геометрических размеров ТЕМ-рупора: $L_1 = 10$ мм, $L_2 = 50$ мм, $B_1 = 10$ мм, $B_2 = 90$ мм, $H_1 = 2$ мм, $H_2 = 40$ мм

(1) преобразуется, и для плоскости апертуры можно записать:

$$\epsilon(x, y) = \frac{\left(\frac{H_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{B_2}{2}\right)^2 + (L_2 + p)^2}{x^2 + y^2 + (L_2 + p)^2}, \quad (2)$$

где x и y – координаты отклонения точки на плоскости раскрыва от центра (в обозначениях рис. 2), а p – расстояние от плоскости переходной линии запитки в лепестки до фазового центра. Следует отметить, что выражение (2) определялось исходя из того, чтобы при максимальном отклонении от оси рупора $\epsilon = 1$.

В данной работе в качестве примера использовались следующие геометрические размеры: $L_1 = 10$ мм, $L_2 = 50$ мм, $B_1 = 10$ мм, $B_2 = 90$ мм, $H_1 = 2$ мм, $H_2 = 40$ мм, распределение ϵ для которых приведено на рис. 2.

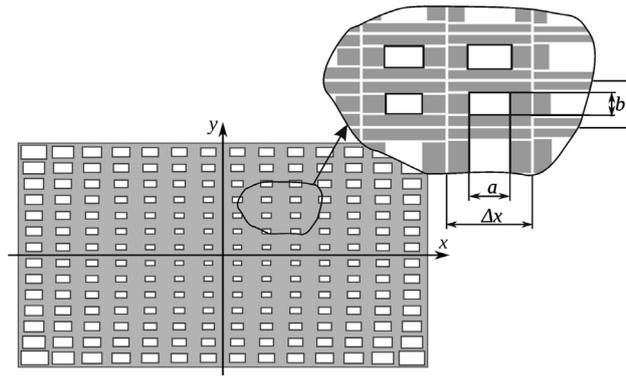
2. Синтез структуры с распределенной диэлектрической проницаемостью

Очевидно, что создание структуры с непрерывно изменяющейся диэлектрической проницаемостью представляется, на сегодняшний день, весьма затруднительным. Один из возможных вариантов решений данной проблемы описан в [7], где пространство между лепестками антенны было заполнено косоугольными пирамидами с разной диэлектрической проницаемостью, вершины которых лежали в фазовом центре. Таким образом, пространство неоднородной структуры представляется большим числом областей с постоянной диэлектрической проницаемостью. Такой подход является приемлемым для описания антенны при моделировании, но не для изготовления.

В данной работе предлагается другой способ формирования переменной диэлектрической проницаемости, который состоит в использовании перфорированного диэлектрика. Предполагается, что его можно считать вспененным диэлектриком, подчиняющимся логарифмическому закону смещения, а диэлектрическую проницаемость описывать формулой Лихтенеккера [8]. Вспененный диэлектрик представляет собой неупорядоченную смесь с воздухом некоторого материала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{\text{диэл}}$ и объемной концентрацией $Q_{\text{диэл}}$. Опуская очевидные выкладки можно записать:

$$\epsilon = \exp(Q_{\text{диэл}} \ln \epsilon_{\text{диэл}}). \quad (3)$$

Создание вспененного материала, с переменным и контролируемым отношением объемов диэлектрика и воздуха в настоящее время не представляется возможным. Однако для числен-



а)



б)

Рис. 3. Пример одного слоя неоднородной диэлектрической среды (а) и ее фотография (б)

ных расчетов и дальнейших экспериментов была использована следующая модель: Пространство внутри антенны было разбито на слои толщиной 0,4 мм. Каждый слой делился на ячейки размером не менее 3×3 мм (Δx и Δy в обозначениях рис. 3, а), в центре которых определялась диэлектрическая проницаемость по формуле (2). Затем в данной ячейке перфорировалась (заполнялась воздухом) центральная область. Для удобства в качестве такой воздушной полости выбирался параллелепипед со сторонами: $a = k\Delta x$ и $b = k\Delta y$ (рис. 3, а), где Δx и Δy – размер ячейки, а k определяется по формуле:

$$k = 1 - \left(\frac{\ln \varepsilon}{\ln \varepsilon_{\text{диэл}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{диэл}}$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика, ε – диэлектрическая проницаемость, которую требуется получить в центре ячейки. Таким образом, в общем случае коэффициент k является функцией координат x, y, z . Следует также отметить, что Δx и Δy постоянны в пределах каждого слоя и вычисляются исходя из его высоты и ширины так, чтобы были не меньше 3 мм. Данный размер был выбран исходя из ограничений технологии изготовления неоднородной диэлектрической среды.

3. Исследование ТЕМ-рупора с неоднородным диэлектрическим заполнением

Для синтеза предложенного неоднородного диэлектрического заполнения была написана программа, генерирующая трехмерную модель в виде файла в формате STL (stereo lithography). Электродинамическое моделирование производилось с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) [9]. Для

симуляции пространства за пределами счетного объема использовались граничные условия типа PML (perfectly matched layer) [10; 11] (4 слоя), где расстояние от проводящей структуры до границы счетного объема поддерживалось не менее 20 мм.

Предложенная структура (рис 3, б) также была изготовлена по технологии FDM (fused deposition modeling) при помощи 3D-принтера MakerBot Replicator 2X. В качестве материала использовалась нить из полистирола.

Основными характеристиками, которые рассчитывались при моделировании являлись затухание несогласованности по входу (return loss) и коэффициент усиления антенны. Экспериментальное исследование этих характеристик проводилось при помощи векторного анализатора цепей Agilent PNA-L 5230C.

На рис. 4, а приведены зависимости затухания несогласованности по входу (return loss) для антенны без заполнения неоднородной диэлектрической средой. Из графиков видно хорошее согласование расчетных и экспериментальных характеристик. Наблюдаемое расхождение в диапазоне от 13 до 17 ГГц объясняется тем, что в реальном устройстве присутствовали коаксиально-полосковый переход и симметрирующее устройство, несколько улучшающие согласование в данном диапазоне.

На рис. 4, б приведены зависимости затухания несогласованности по входу (return loss) для антенны с заполнением пространства между лепестками неоднородной диэлектрической средой. В случае моделирования наблюдается улучшение согласования в нижней области, а именно уменьшение нижней граничной частоты по уровню -10 дБ с 4,4 ГГц до 2,3 ГГц. При этом в эксперименте удовлетворительное согласование (< -10 дБ) по входу антенны наблюдалось от 2,3 до 26,2 ГГц.

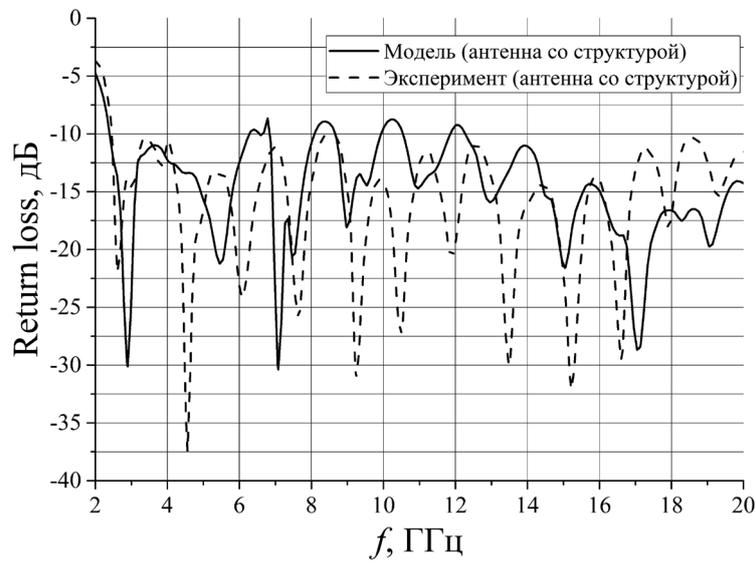
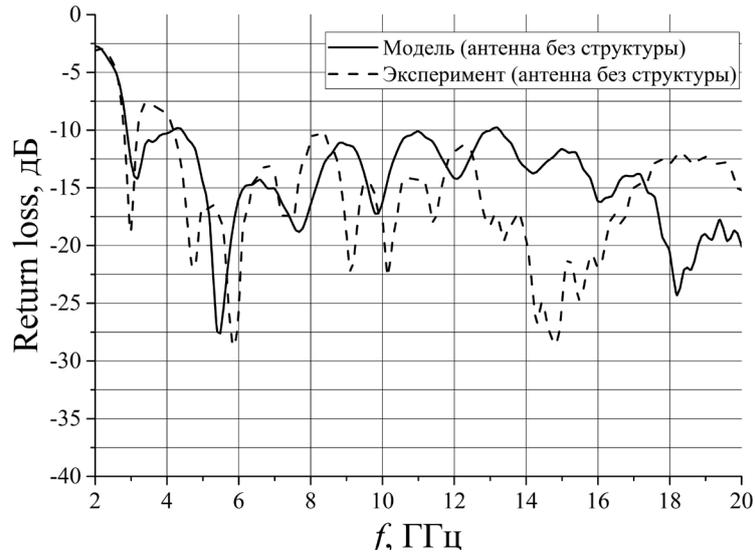


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости Return Loss (затухания несогласованности) для антенны без (а) и с (б) неоднородным диэлектрическим заполнением

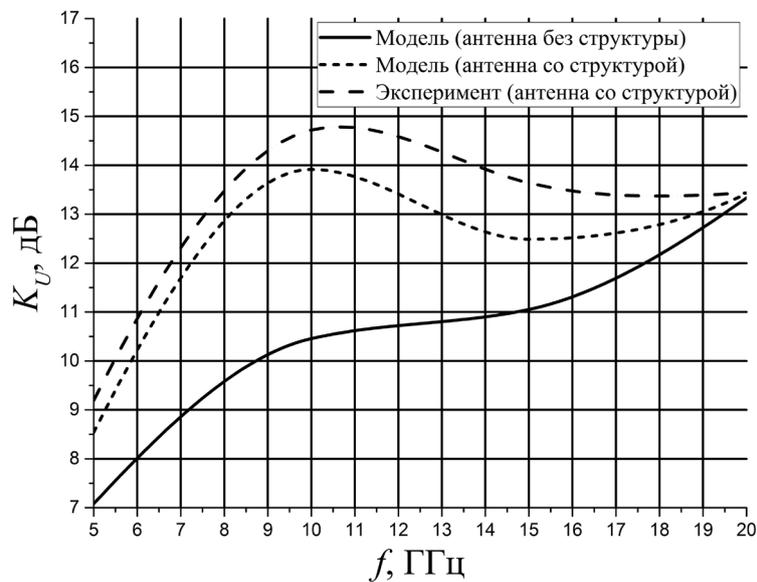


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления антенны от частоты

На рис. 5 приведены частотные зависимости коэффициента усиления K_U в главном направлении. Как видно из графиков при использовании неоднородной диэлектрической среды удается получить выигрыш в направленности антенны от 1,5 дБ на 5 ГГц до 3,5–4 дБ в области 10 ГГц. Несмотря на то, что в верхнем частотном диапазоне (от 17 до 20 ГГц) прирост коэффициента усиления выглядит незначительным, диаграмма направленности антенны в случае использования неоднородной диэлектрической структуры существенно улучшается: предотвращается расщепление диаграммы направленности и резко возрастает коэффициент подавления боковых лепестков.

Расхождения расчетной и экспериментально измеренной зависимостей коэффициента усиления антенны объясняется тем, что при изготовлении неоднородной диэлектрической среды использовался метод FDM печати, которому характерно неизбежное отклонение от геометрических размеров трехмерной модели за счет температурного сжатия и расширения материала.

Заключение

В работе предложено неоднородное диэлектрическое заполнение пространства между лепестками ТЕМ-рупора. Несмотря на сложность изготовления, такая среда позволяет улучшить характеристики согласования и направленные свойства антенны. Наиболее существенным эффектом применения неоднородное диэлектрического заполнения для примера, приведенного в работе, является уменьшение нижней границы рабочего диапазона на 2 ГГц по уровню –10 дБ и рост коэффициента усиления в среднем на 3 дБ. Кроме того начиная с 10 ГГц удалось уменьшить уровень боковых лепестков и предотвратить искажение диаграммы направленности за счет несинфазности излучения в плоскости раскрыва.

В работе также изложена методика построения трехмерной модели предложенной неоднородной диэлектрической среды, которая может быть изготовлена с помощью технологий трехмерной печати. Экспериментально измеренные характеристики достаточно хорошо согласуются с результатами моделирования.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-7902.2016.9).

Список литературы.

1. Анализ ТЕМ-рупорной антенны с помощью метода конечных разностей во временной области / А.М. Бобрешов [и др.] // Антенны. 2011. № 4. С. 60–63.
2. Влияние величины волнового сопротивления у раскрыва ТЕМ-рупора на характеристики излучения сверхкороткого импульса заданной формы / А.М. Бобрешов [и др.] // Труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова. Серия «Научная сессия, посвященная Дню радио» (выпуск LXVII). 16–17 мая 2012 г., Москва. С. 22.
3. Бобрешов А.М., Мещеряков И.И., Усков Г.К. Оптимизация угла раскрыва ТЕМ-рупора для эффективного излучения сверхкоротких импульсов // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 3. С. 320–324.
4. Венецкий А.С., Калошин В.А. Синтез градиентной линзовой антенны с осевой симметрией и криволинейной формой преломляющих поверхностей // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42. № 12. С. 1452–1458.
5. Ефимова Н.А., Калошин В.А., Скородумова Е.А. Исследование рупорно-линзовой ТЕМ-антенны // Радиотехника и электроника. 2012. № 12. Т. 57. С. 1020–1027.
6. Ефимова Н.А., Калошин В.А. О согласовании симметричных ТЕМ-рупоров // Радиотехника и электроника. 2014. № 1. Т. 59. С. 60.
7. Синтез неоднородной диэлектрической среды для улучшения характеристик ТЕМ-рупора / А.М. Бобрешов [и др.] // Радиотехника. 2016. № 6. С. 159–162.
8. Томилин В.И., Томилина Н.П., Бахтина В.А. Физическое материаловедение; в 2-х ч. Ч. 1. Пассивные диэлектрики: учеб. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
9. Программа электродинамического моделирования RFDTD-3D / / А.М. Бобрешов [и др.]. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2012660468. 2013.
10. Taflov A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference TimeDomain Method. Norwood: Artech House, 1995.
11. Berenger J.-P. Perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of Computational Physics. 1994. Vol. 114. P. 185–200.

Experimental reserch of TEM-horn antenna with inhomogeneous dielectric

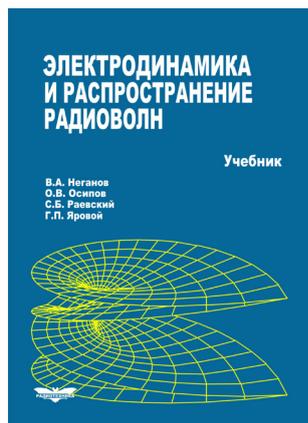
A.M. Bobreshov, P.A. Kretov, N.S. Sbitnev, G.K. Uskov

There proposed a technique for improving linear TEM-horn antenna directivity and matching by filling its inner space with inhomogeneous dielectric medium. The exact shape of the medium permittivity's spatial distribution was chosen from an assumption of the whole wavefront being a result of straight-line emission from a lumped phase center. The Lichtenecker's formula for two-phase composite material was used to approximate permittivity's smooth transitions with a complex punched structure of a solid dielectric. This punched structure was manufactured using a 3D-printer, and its impact on antenna's quality characteristics was experimentally measured.

Keywords: TEM-horn antenna, inhomogeneous dielectric, directivity, matching, linear TEM-horn antenna.

Неганов, В.А.

Электродинамика и распространение радиоволн: учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)

ББК 22.3

Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.