

УДК 537.862

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РУПОРНОЙ АНТЕННЫ

Ю. А. Амчиславский<sup>1</sup>, И. М. Купцов<sup>1</sup>, Е. В. Булычев<sup>2</sup>, Н. Л. Меньших<sup>2</sup>, С. А. Федоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (национально-исследовательский университет), 141700, г. Долгопрудный Моск. обл., Институтский пер. 8

<sup>2</sup>Институт прикладной и теоретической электродинамики РАН,  
25412, г. Москва, ул. Ижорская, 13

Статья поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

**Аннотация.** В статье исследовано распределение поля в ближней зоне широкополосной рупорной антенны типа П6-23. С помощью двумерного сканера выполнены измерения распределения амплитуды и фазы поля на различном расстоянии от раскрыва антенны в конфигурациях с линзой и без. Проведено численное моделирование распределения поля в ближней зоне антенны строгим методом моментов с использованием программного комплекса FEKO. Анализ полученных результатов позволил сделать выводы о возможных ограничениях в использовании такой антенны в качестве приемно-передающей антенны в измерительных стендах. Предложена модернизация антенны за счет нанесения плоского тонкого слоя широкополосного радиопоглощающего материала на внутренние стенки рупора. Данная модернизация обеспечивает значительное уменьшение неравномерности распределения амплитуды поля в ближней зоне в широкой полосе частот от 4 до 15 ГГц.

**Ключевые слова:** широкополосные антенны, сканерные измерения, численное моделирование, FEKO, метод моментов.

**Abstract.** The article is devoted to the investigation of the spatial distribution of the electromagnetic field of the broadband horn P6-23 antenna in the near-field region. The amplitude and phase distribution of the electromagnetic field is measured by the two-dimensional electromagnetic near-field scanner at different distances from the antenna aperture. The measurements are carried out at two configurations: with and

without lens. The numerical simulations of the near field distribution of the antenna are performed by the computational electromagnetics software package FEKO using the rigorous method of moments. Based on the obtained results the conclusions about possible restrictions of the investigated antenna as a part of a measurement system are made. The antenna modernization by coating of the inner surface of the horn walls by a thin layer of the broadband radar absorbing material is proposed. It is demonstrated that the modernization provides the significant reduction in the non-uniformity of the near-field amplitude distribution in a wide frequency band from 4 to 15 GHz. It is demonstrated that the area with the appropriate non-uniformity is increased on 10-30% depending on frequency.

**Key words:** wideband antennas, microwave scanner measurement, numerical simulation, FEKO, method of moment.

## Введение

Широкополосные рупорные антенны с коньковым переходом получили широкое распространение в качестве приемных и передающих антенн в измерительных установках [1]. Их популярность обусловлена в первую очередь удобством использования одной антенны в большом диапазоне частот. В частности, такие антенны используются в установках для измерения параметров материалов [2].

При использовании антенн в измерительных схемах на них накладываются ряд требований. Обычно необходимо выполнение критерия дальней зоны для корректности измерений [3], т.е. требуется, чтобы падающая на измеряемый объект волна была квазиплоской. Однако, в ряде случаев при невыполнении критерия дальней зоны можно получать вполне корректные результаты измерений. В частности, измерения параметров плоских тонких (в длинах волн) образцов материалов часто проводятся в ближней зоне антенн [4, 5], где падающая на образец волна не является квазиплоской.

Поле в ближней зоне антенны может сильно меняться в зависимости от расстояния от антенны. Это мало сказывается на точности измерения

параметров тонких образцов материалов, но может сказаться при исследовании оптически толстых образцов.

В последние годы широкое распространение приобрело численное моделирование параметров реальных объектов за счет значительного роста вычислительных мощностей. В работе [6] представлены расчеты диаграмм направленности и распределения поля в ближней зоне малогабаритной широкополосной рупорной антенны с коньковым переходом, выполненные строгим методом моментов. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Моделирование антенн с коньковым переходом также позволяет скорректировать конструкцию в области возбуждения, чтобы оптимизировать характеристики антенны [7], например, уменьшить КСВН.

Целью данной работы является экспериментальное исследование распределения амплитуды и фазы поля в ближней зоне рупорной широкополосной измерительной антенны типа Пб-23, а также моделирование поля излучения антенны вблизи нее.

## **1. Экспериментальная установка для исследования распределения поля в ближней зоне антенны**

Распределение поля в ближней зоне антенны Пб-23А исследовалось с помощью двумерного сканера. В качестве зондов использовались открытые концы волноводов для 3-х и 2-х сантиметровых длин волн и антенна Satimo SH2000 для более низкочастотного диапазона. Сканер устанавливается на определенном расстоянии от антенны и позволяет измерять поле в плоскости сечения, перпендикулярном оси антенны. Вся установка располагается в безэховой камере для уменьшения влияния отражений от стен. Измерения проводились в диапазоне частот от 3 ГГц до 18 ГГц.

Вид измерительной установки показан на рисунке 1.

Сканер позволяет исследовать электромагнитное поле в области 800×800 мм. Точность позиционирования зонда составляет менее 0,1 мм. Отклонение области сканирования от вертикальной плоскости составляет ±0,2 мм.

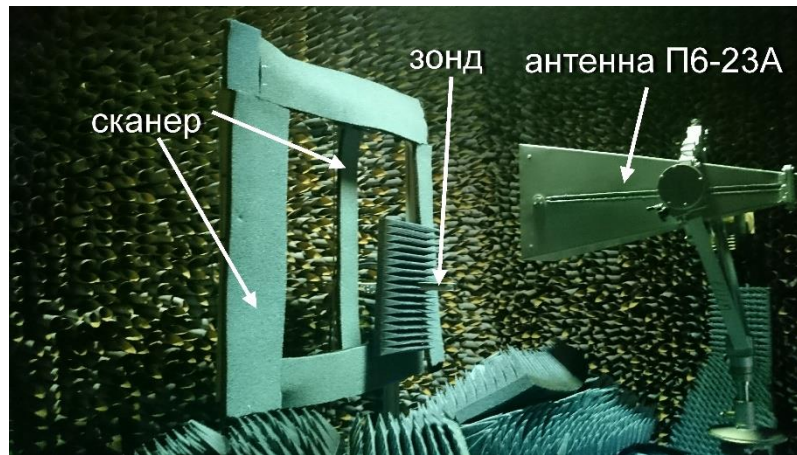


Рис. 1. Вид измерительной установки.

## 2. Моделирование антенны

Компьютерная модель антенны позволяет не только получить численно распределение поля на заданном расстоянии, но и более наглядно проследить тенденцию изменения структуры поля при удалении от раскрыва антенны.

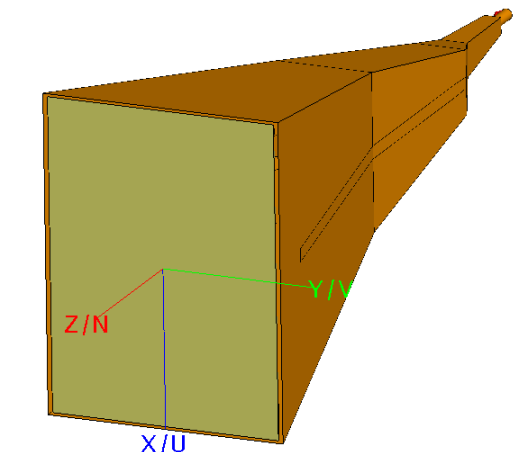


Рис. 2. Вид компьютерной модели антенны П6-23А.

На рисунке 2 представлена модель антенны П6-23А в программе FEKO. Антенна состоит из следующих частей: рупора с изломом образующей, пристыкованного к нему волноводно-коаксиального перехода, диэлектрической линзы и системы возбуждения [8]. В модели антенны стенки рупора и волноводно-коаксиального перехода задаются идеально проводящими. Питание антенны осуществляется коаксиальной линией, которая переходит сначала в линию с прямоугольным внешним проводом, а потом в коньковый волновод.

Диэлектрическая линза выполнена из плотного однородного пенопласта с относительной диэлектрической проницаемостью примерно 1,3. Линза плоско-выпуклая, плоская сторона обращена наружу антенны, утоплена относительно раскрытия антенны на 1 см. Выпуклая сторона линзы аппроксимировалась в модели пересечением двух гиперболических цилиндров с образующими, лежащими в двух главных плоскостях, E и H.

Расчет распределения поля проводился методом моментов [9] с использованием программы FEKO. Применение данного метода позволяет получить распределение поля в ближней зоне антенны строгим методом с достаточной точностью для оценки значений колебаний поля в заданном сечении.

### 3. Сравнение результатов

Результаты расчетов характеристик антенны в программе FEKO сравнивались с паспортными данными [8], такими, как коэффициент усиления (рисунок 3), и с экспериментально полученными диаграммами направленности (ДН) антенны в диапазоне частот 8,2 – 12 ГГц. На рисунке 4 приведены ДН на частоте 12 ГГц. Отличие в уровнях боковых лепестков связано с не точным совпадением сечения объемной диаграммы направленности в эксперименте с расчетным. Паспортные и экспериментальный данные находятся в хорошем соответствии с результатами моделирования.



Рис. 3. Коэффициент усиления антенны Пб-23А.

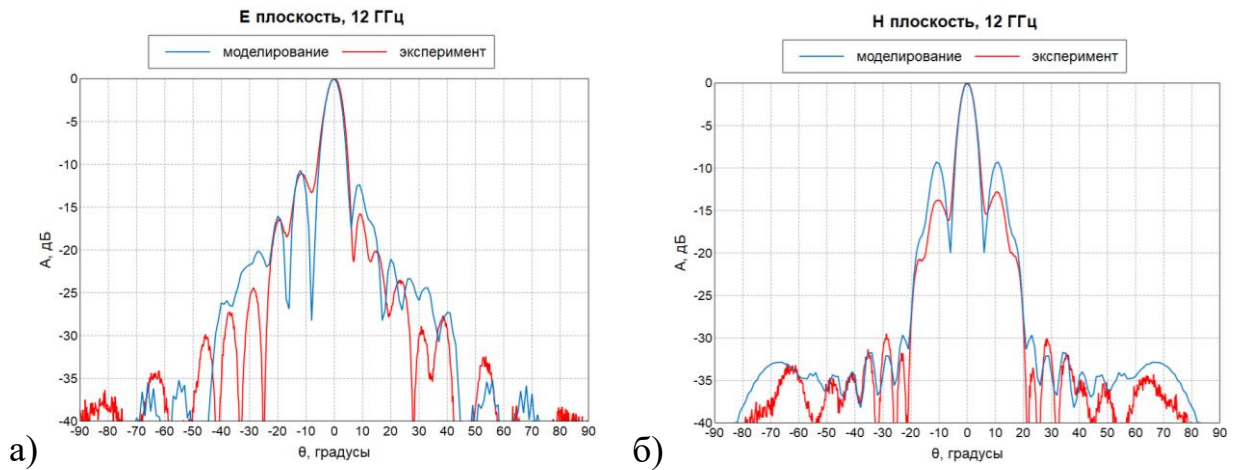


Рис. 4. Диаграмма направленности антенна П6-23А на частоте 12 ГГц, а) в плоскости Е, б) в плоскости Н.

Рассмотрим результаты численного и натурального экспериментов по исследованию полей в ближней зоне антенны. На рисунках 5 – 7 приведены распределения полей на расстоянии 40 см от апертуры антенны П6-23А, полученные при моделировании и при сканировании поля открытым концом волновода на частотах 9,5 ГГц, 10,5 ГГц и 12 ГГц. Данное сечение выбрано как наиболее характерное расстояние от антенны до объекта исследования в стенде, описанном в работе [2].

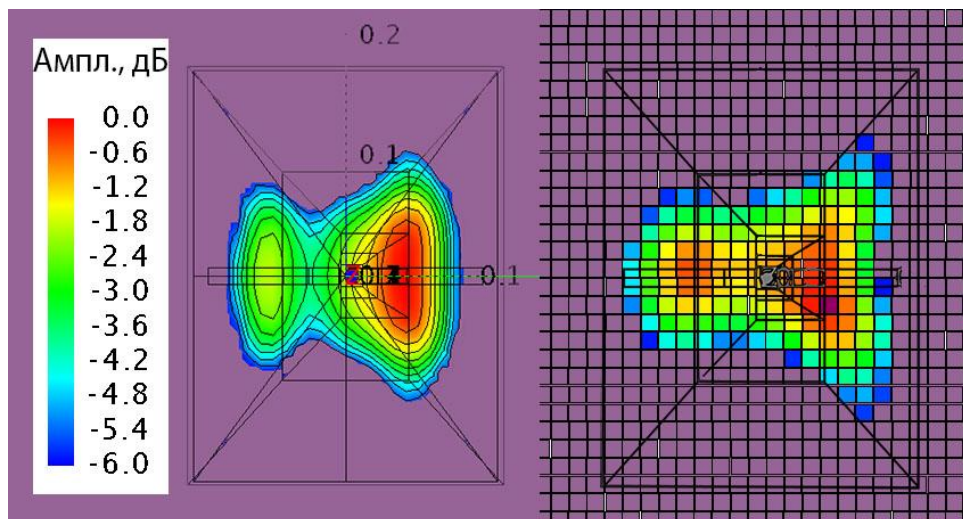


Рис. 5. Распределение амплитуды поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 9,5 ГГц в компьютерной модели (слева) и в эксперименте (справа).

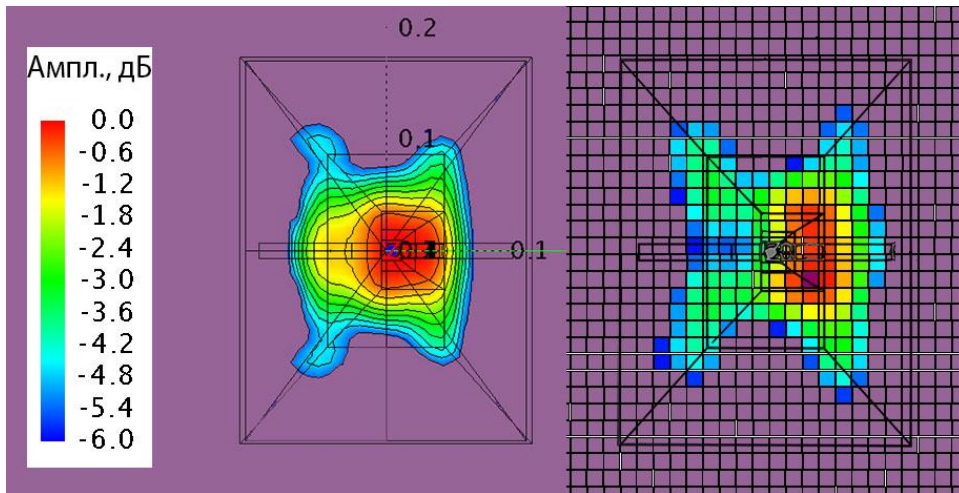


Рис. 6. Распределение амплитуды поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 10,5 ГГц в компьютерной модели (слева) и в эксперименте (справа).

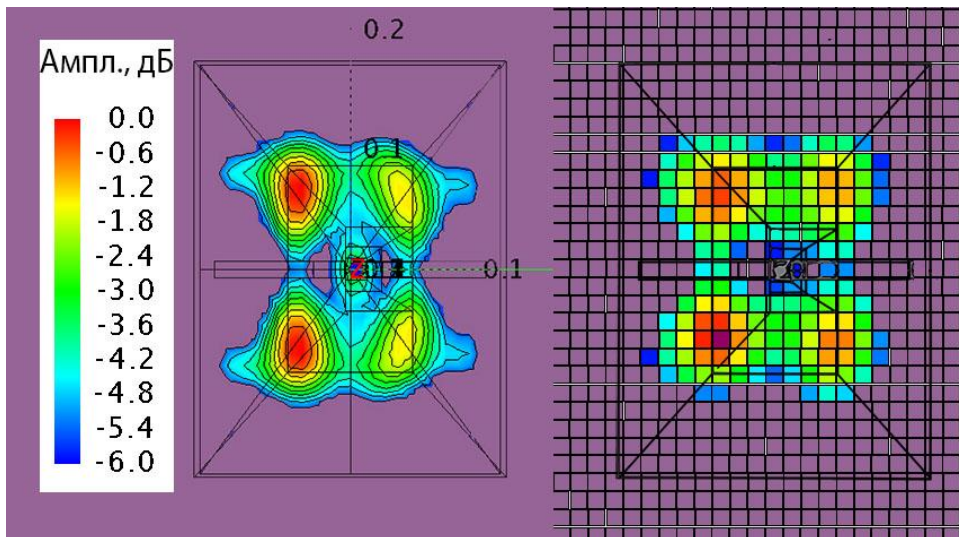


Рис. 7. Распределение амплитуды поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 12 ГГц в компьютерной модели (слева) и в эксперименте (справа).

Представленные результаты показывают, что компьютерная модель антенны соответствует реальной антенне, результаты численного и натурального экспериментов хорошо согласуются друг с другом. Также из данных исследований можно заключить, что распределение амплитуды поля в ближней зоне антенны сильно неоднородно, особенно на высоких частотах. На частотах более 11 ГГц наблюдаются провалы в распределении амплитуды поля больше 6 дБ, лежащие в центральной области сканирования поля антенны.

Исследование распределения фазы показали аналогичные результаты. Размеры областей с приемлемой неравномерностью по амплитуде и по фазе примерно совпадают. На рисунке 8, как пример, представлено распределение фазы поля на частоте 10,5 ГГц на расстоянии 40 см от раскрыва рупора.

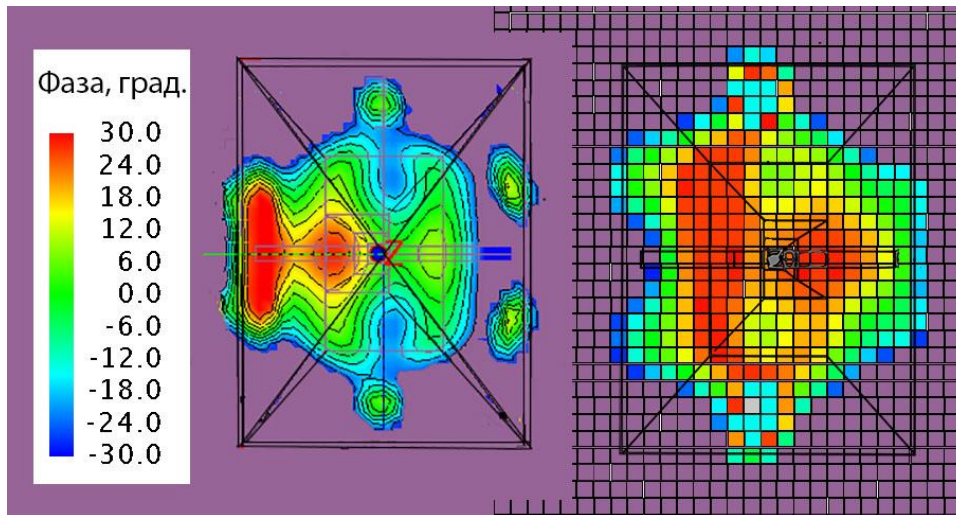


Рис. 8. Распределение фазы поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны Пб-23А на частоте 10,5 ГГц в компьютерной модели (слева) и в эксперименте (справа).

При использовании антенны в ближнепольных измерениях необходимо учитывать существенное отличие распределения поля от поля плоской волны и возможное влияние этого отличия на результаты измерений.

#### 4. Возможности по модернизации антенны

Неравномерность амплитуды и фазы электромагнитного поля существенно превосходят допустимые значения по критерию  $\pi/8$ . Поэтому исследования возможностей уменьшения неравномерности поля представляют особый интерес.

Нанесение радиопоглощающего материала (РПМ) на стенки рупора помогает уменьшить неравномерность поля. В рупоре с поглощающим покрытием, аналогично рупорной безэховой камере [10], волна трансформируется в волну, имеющую в обоих главных сечениях распределение амплитуды поля, меняющееся по косинусоидальному закону. РПМ уменьшает влияние дифракционных эффектов на краях рупора, что в свою очередь



ведет к уменьшению уровней боковых лепестков в ДН. Исследуем распределение поля в ближней зоне антенны и влияние на него РПМ на внутренних стенках рупора для антенны типа Пб-23.

На стенки рупора наносилось покрытие РАН-29, представляющее собой плоский слой диэлектрического материала толщиной 10 мм. При этом покрывались все стенки рупора, сами волноводно-коаксиальные переходы материалом не покрывались. На рисунке 9 представлен вид внутренней части антенны с покрытием и без него.

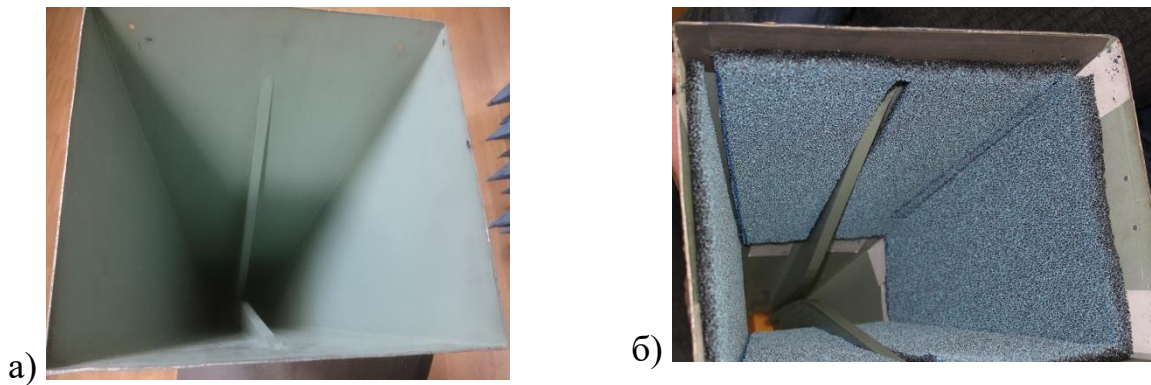


Рис. 9. Вид внутренней части антенна Пб-23А без линзы а) стандартный, б) с РПМ на стенках.

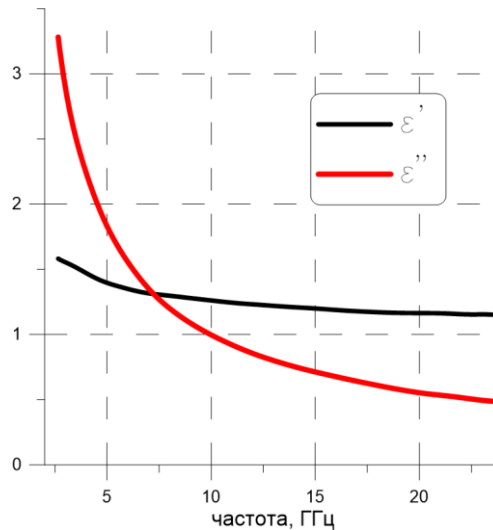


Рис. 10. Зависимость действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости РПМ РАН-29 от частоты.

Характеристики РПМ в зависимости от частоты получены экспериментально и представлены на графике на рисунке 10. В модели камеры использовалось значение диэлектрической проницаемости материала для

рассматриваемой частоты.

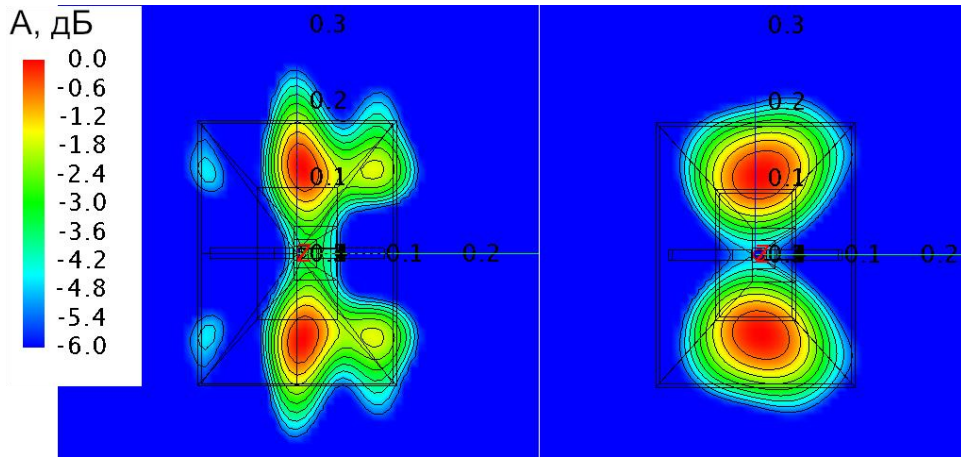


Рис. 11. Распределение амплитуды поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 6 ГГц в компьютерной модели антенны без РПМ (слева) и с РПМ (справа).

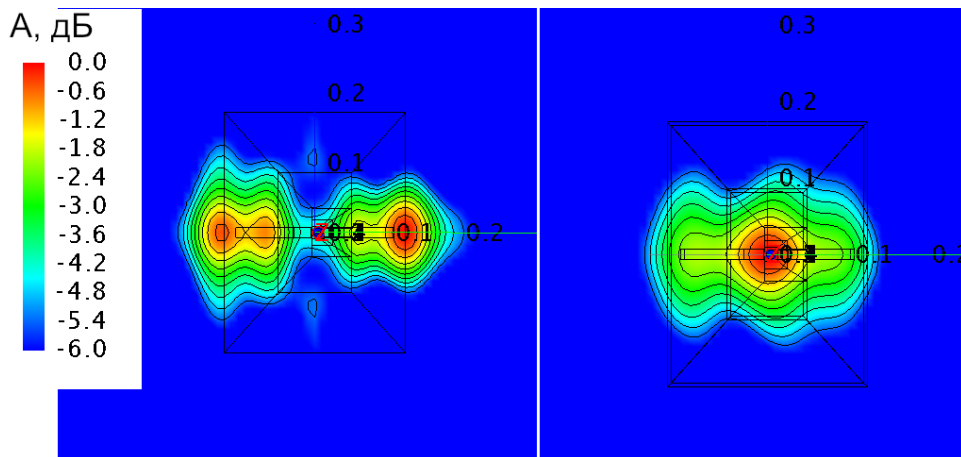


Рис. 12. Распределение амплитуды поля на расстоянии 40 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 8 ГГц в компьютерной модели антенны без РПМ (слева) и с РПМ (справа).

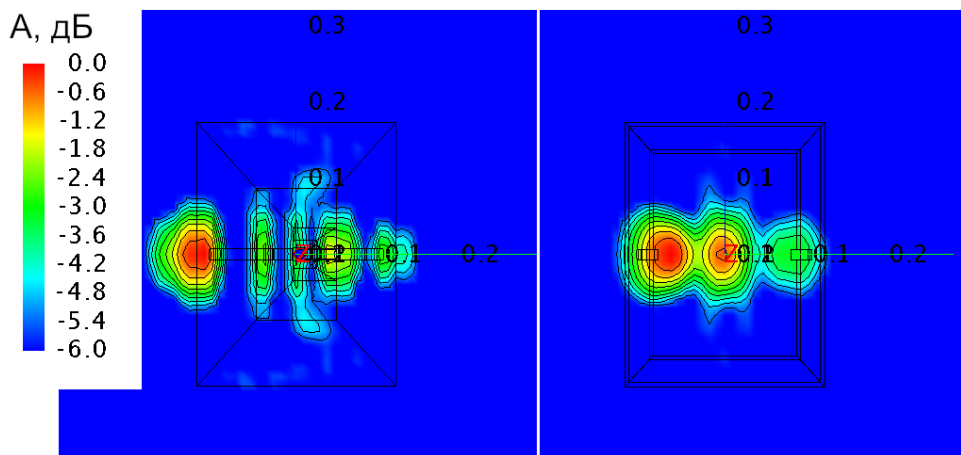


Рис. 13. Распределение амплитуды поля на расстоянии 23 см от раскрыва антенны П6-23А на частоте 14,5 ГГц в компьютерной модели антенны без РПМ (слева) и с РПМ (справа).

На рисунках 11 – 13 представлены результаты расчетов распределения амплитуды поля на расстоянии 40 см и 23 см от раскрыва антенны без линзы и этой же антенны, но уже с покрытыми материалом стенками.

Из графиков распределения поля видно, что нанесение РПМ на стенки рупора позволяет сконцентрировать больше энергии в центральной области и даже иногда объединить несколько максимумов амплитуды в единую зону с относительно небольшими колебаниями. Данный эффект наблюдается в широкой полосе частот от низких (6 ГГц) до наиболее высоких (15 ГГц). При этом область с приемлемой неравномерностью распределения амплитуды и фазы поля увеличивается в среднем на 10 – 30% в зависимости от частоты внутри указанного диапазона.

Моделирование характеристик антенны на высоких частотах сопряжено с рядом технических трудностей. Антенна имеет довольно большие размеры и расчет ее строгим методом требует большой объем оперативной памяти. Поэтому расчет поля после раскрыва антенны проводился в два этапа: считалось поле внутри антенны в сечении с РПМ на стенках, а потом это поле использовалось в качестве источника излучения и пересчитывалось уже в поле после раскрыва. Такой метод расчета, конечно, не корректен, но данный способ позволяет сделать некоторую оценку возможностей модернизации антенны.

Для получения более достоверной информации о работе покрытий на стенках рупора были проведены экспериментальные исследования распределения поля антенны с покрытиями и без них. На рисунках 14 – 16 представлены экспериментальные результаты исследования распределения амплитуды поля на расстоянии 230 мм от раскрыва антенны без покрытия и с покрытием внутри.

Обратим внимание на тот факт, что распределения полей на частоте 14,5 ГГц, полученные в результате моделирования и экспериментов, хоть и сложно назвать идентичными, обладают тем не менее явным сходством.

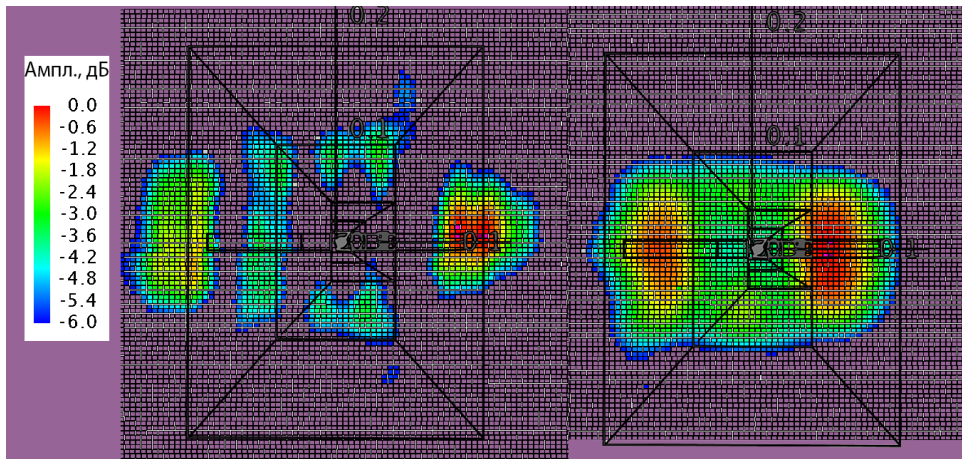


Рис. 14. Распределение амплитуды поля на расстоянии 23 см от раскрыва антенны П6-23 (без линзы) на частоте 14,5 ГГц, антенна без РПМ (слева) и антенна с РПМ (справа).

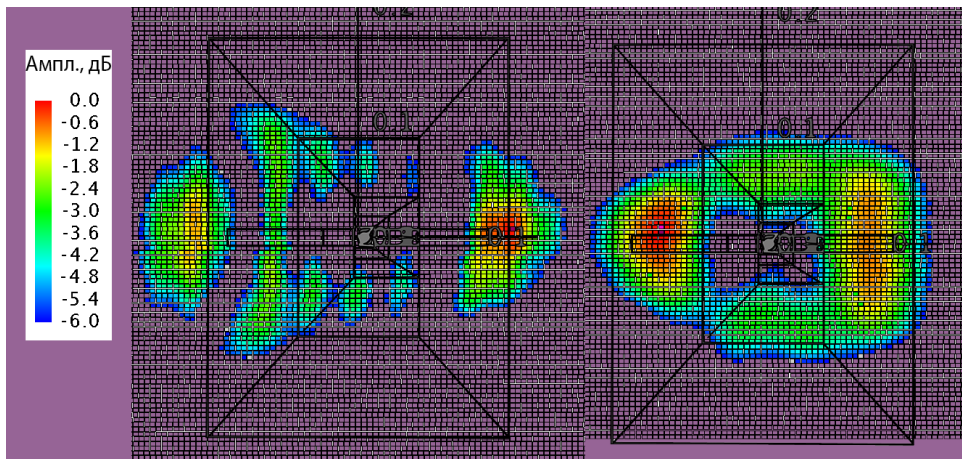


Рис. 15. Распределение амплитуды поля на расстоянии 23 см от раскрыва антенны П6-23 (без линзы) на частоте 16 ГГц, антенна без РПМ (слева) и антенна с РПМ (справа).

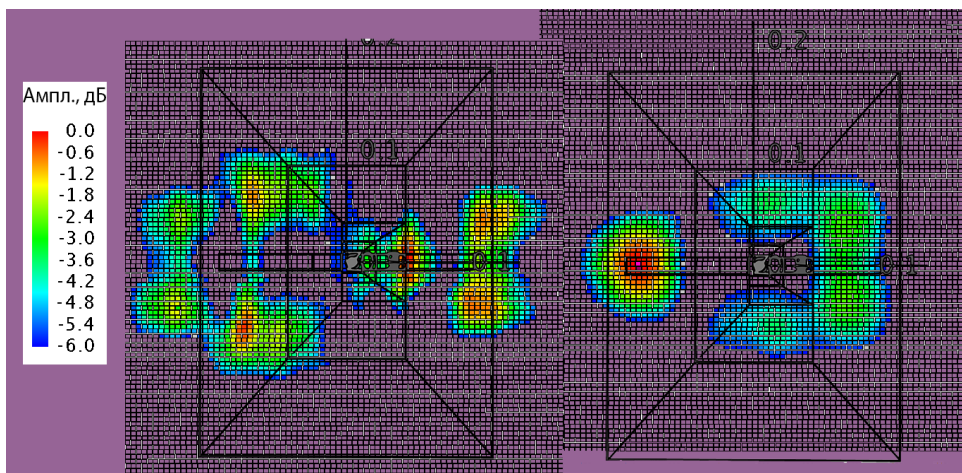


Рис. 17. Распределение амплитуды поля на расстоянии 23 см от раскрыва антенны П6-23 (без линзы) на частоте 18 ГГц, антенна без РПМ (слева) и антенна с РПМ (справа).

На частотах до 15 ГГц за счет нанесения РПМ на стенки рупора наблюдается значительное уменьшение провала в распределении амплитуды поля в центре области сканирования. Качественно картина поля меняется: вместо нескольких отдельных пиков появляется единая область с относительно небольшой неравномерностью распределения амплитуды и фазы поля.

На частотах 15 – 18 ГГц распределение поля после раскрытия модернизированной антенны уже не имеет единой области с приемлемой неравномерностью по амплитуде и фазе. Однако, электромагнитное поле концентрируется в центральной области, которая имеет существенные провалы по амплитуде и фазе.

Результаты численного и натурного экспериментов показали, что нанесение РПМ на стенки рупорной антенны позволяет существенно уменьшить неравномерность распределения поля вблизи раскрытия антенны в широкой полосе частот от 4 до 15 ГГц.

### **Заключение**

Разработана компьютерная модель широкополосной рупорной линзовой антенны с коньковым переходом П6-23А. Проведены численные и натурные экспериментальные исследования распределения полей в ближней зоне антенны. Результаты моделирования находятся в соответствии с результатами экспериментальных исследований. Получена значительная неравномерность распределения амплитуды (более 6 дБ) и фазы (более  $\pm 20^\circ$ ) поля в ближней зоне антенны, что может оказывать влияние на результаты измерения при использовании данной антенны в качестве приемно-передающей антенны.

Исследована возможность модернизации антенны за счет нанесения РПМ на стенки рупора с целью уменьшения неравномерности распределения поля в ближней зоне. Достигнуто уменьшение неравномерности поля в широкой полосе частот от 4 до 15 ГГц. Площадь области с приемлемой неравномерностью амплитуды и фазы поля при этом увеличилась примерно до 30% в указанном диапазоне частот.

## Литература

1. Milligan T. Modern antenna design. 2nd ed. Wiley: New Jersey. 2005. 614pp.
2. Семенов В.Н., Чистяев В.А., Политико А.А., Басков К.М. Стенд для измерения в свободном пространстве радиофизических параметров материалов в сверхширокой полосе сверхвысоких частот // Измерительная техника. 2019. №2.
3. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007. 266 с.
4. Казанцев Ю.Н., Козырев А.Н., Солосин В.С. Измерение коэффициентов отражения, близких к единице, при помощи квазиоптического рефлектометра на основе полых металлодиэлектрических волноводов // Радиотехника и Электроника. 2011. Т.56, №6, сс.682-688.
5. Дьяконова О.А., Казанцев Ю.Н., Маречек С.В., Воронин И.В., Горбатов С.А. Методы и средства для измерения коэффициентов отражения от плоских образцов на миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волн // Приборы и техника эксперимента, 2011, №2, сс.51 – 57.
6. C. Bruns, P. Leuchtmann, R. Vahldieck. Analysis of a 1 – 18 GHz broadband double-ridged horn antenna // IEEE Trans. on electromagnetic compatibility, V. 45, No. 1, February 2003. P. 55.
7. T.-C. Lin, C.-H. Lee, J.-L. Dong, C.-N. Chiu, D.-B. Lin, H.-P. Lin. A new uniformity-enhanced double ridged horn antenna for radiated susceptibility test from 1 GHz to 18 GHz // 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC), 14-18 May 2018.
8. Антенна измерительная Пб-23А. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 1990 г.
9. Вычислительные методы в электродинамике. Под ред. Митры. М.: Мир, 1977. 487с.
10. Hemming L. H. Electromagnetic anechoic chambers a fundamental design and specification guide. IEEE Press and Wiley Interscience.: New-York, 2002.

### Для цитирования:

Ю. А. Амчиславский, И. М. Купцов, Е. В. Булычев, Н. Л. Меньших, С. А. Федоров. Экспериментальное и численное исследование распределения поля в ближней зоне широкополосной рупорной антенны. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct19/10/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.10.10