

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ КОЛЛИМАТОРА МАК-5

Н. П. Балабуха, А. А. Башарин
Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН

Получена 21 мая 2009 г.

В работе исследуются поля в рабочей зоне компактного полигона МАК-5, в диапазоне частот от 8 ГГц до 10 ГГц. Зеркало коллиматора представляет собой несимметричную вырезку из параболоида вращения с фокусным расстоянием 3.5 м, поперечные размеры которого 4.5 м на 5 м. Дан обзор применяемых облучателей и приведены распределения полей в рабочей зоне коллиматора. Показано, что распределение поля состоит из двух составляющих. Первая составляющая связана с полем облучателя. Эта составляющая тем равномернее, чем ближе форма главного лепестка диаграммы направленности облучателя к столообразной. Вторая составляющая связана с уровнем поля облучателя на кромках зеркала коллиматора. Эта дифракционная составляющая вносит осциллирующий характер в распределение поля. Приведены рекомендации по выбору облучателей коллиматора.

Ключевые слова: антенны, экспериментальная электродинамика, коллиматор.

Введение

Зеркальный коллиматор МАК – 5 (Рис. 1) используется в компактных полигонах для формирования рабочей зоны с квазиплоской волной [1]. Зеркало коллиматора представляет собой несимметричную вырезку параболоида вращения, состоящего из 67 щитов, с фокусным расстоянием 3.5 м, поперечные размеры которого, 4.5 м на 5 м. Для формирования рабочей зоны диаметром 2 м с неравномерностью амплитуды поля волны ± 0.5 дБ, необходимо обеспечить диаграмму направленности облучателя с амплитудной вершиной неравномерностью ± 0.5 дБ в секторе углов $\pm 20^\circ$ и со спадом поля ниже -10 дБ в направлениях на кромки зеркала коллиматора в секторе углов $\pm 40^\circ$.

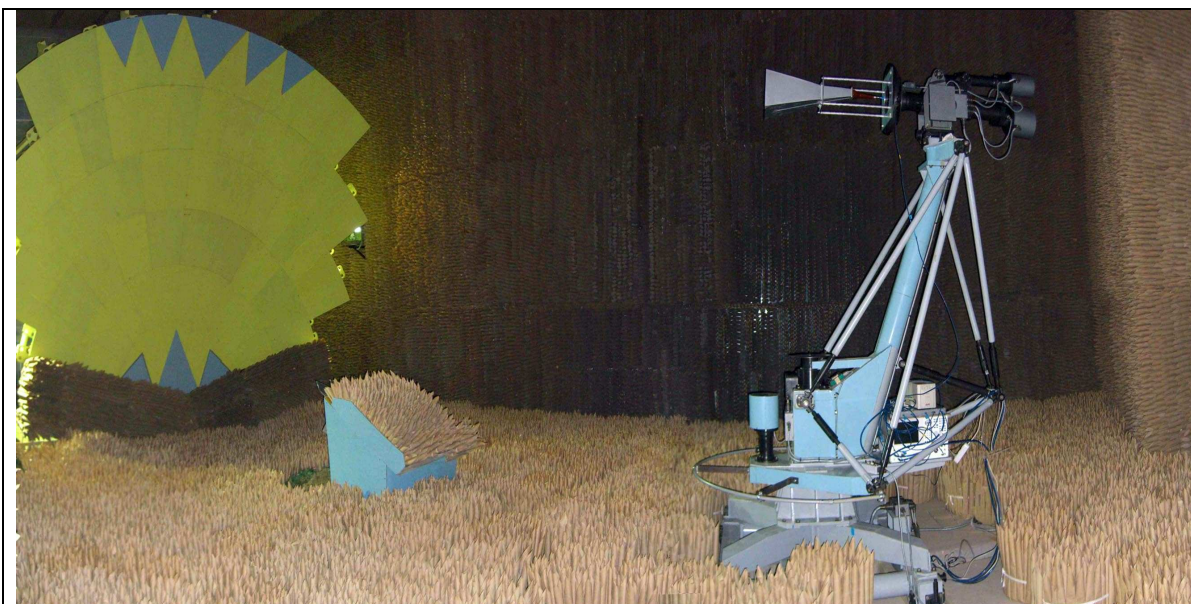


Рис. 1 Коллиматор МАК-5

Основным требованием, предъявляемым к коллиматорам, является равномерность амплитудного и фазового распределения электромагнитного поля, создаваемого в рабочей зоне. Отличие электромагнитного поля в рабочей зоне коллиматора от поля плоской волны вызвано в основном дифракционными эффектами, обусловленными ограниченными размерами коллиматора и неравномерностью облучения зеркала коллиматора, вызванной направленностью облучателя. Кроме того, на поле в рабочей зоне влияют дефекты, связанные с погрешностями при изготовлении облучателя в направлении конструкции коллиматора, прямое излучение облучателя в направлении рабочей зоны, неточное расположение фазового центра облучателя по отношению к фокусу коллиматора, отражение электромагнитной волны от оборудования безэховой камеры.

Распределение амплитуды поля в рабочей зоне обычно состоит из двух составляющих. Первая составляющая представляет собой плавно меняющуюся часть электромагнитного поля в рабочей зоне. Эта составляющая обусловлена особенностями облучения коллиматора, которые определяются диаграммой направленности облучателя, отклонением отражающей поверхности зеркала коллиматора от поверхности параболоида вращения и неточным расположением фазового центра облучателя по отношению к фокусу коллиматора. Вторая составляющая представляет собой быстро меняющуюся часть электромагнитного поля в рабочей зоне. Эта составляющая обусловлена в основном дифракцией на кромках зеркала коллиматора, прямым просачиванием поля облучателя в рабочую зону, отражением от стен и оборудования, размещенного в безэховой камере. Уменьшить влияние дифракционных эффектов на поле в рабочей зоне, возможно двумя способами: выполнить края зеркала коллиматора в виде

зубцов или плавно отогнуть [2,3], либо путем применения облучателей со специальной формой диаграммы направленности и низким уровнем поля на кромках зеркала коллиматора.

В данной работе исследуются поля в рабочей зоне коллиматора, в зависимости от используемых облучателей.

Требования, предъявляемые к облучателям коллиматора

Облучатели должны удовлетворять следующим требованиям [1]:

Облучатель должен создавать на поверхности зеркала коллиматора постоянное в области рабочей зоны и плавно спадающее к минимально возможным значениям на краях зеркала распределение поля в максимально возможной полосе частот.

Облучатель должен быть согласован с питающей линией.

В качестве облучателей коллиматора МАК-5, в той или иной степени удовлетворяющим приведенным выше требованиям, применяются конический рупорный облучатель, облучатель с обратным фланцем [1], диэлектрический стержневой облучатель [4] и облучатель на основе круглого двухслойного волновода из искусственного магнетодиэлектрика [5].

Наиболее простым конструктивно и широко используемым является конический облучатель (Рис. 2), состоящий из круглого волновода с волной H_{11} , который плавно расширяется в направлении оси облучателя. Диаметр раскрыва рупора примерно равен длине волны.

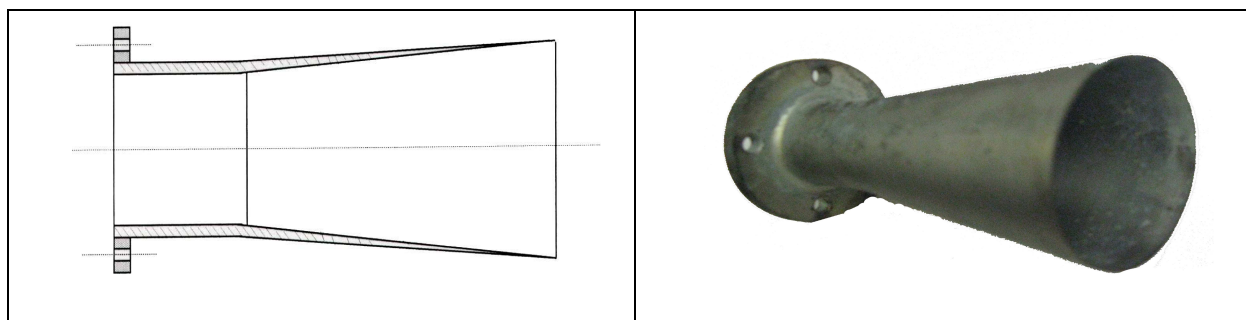
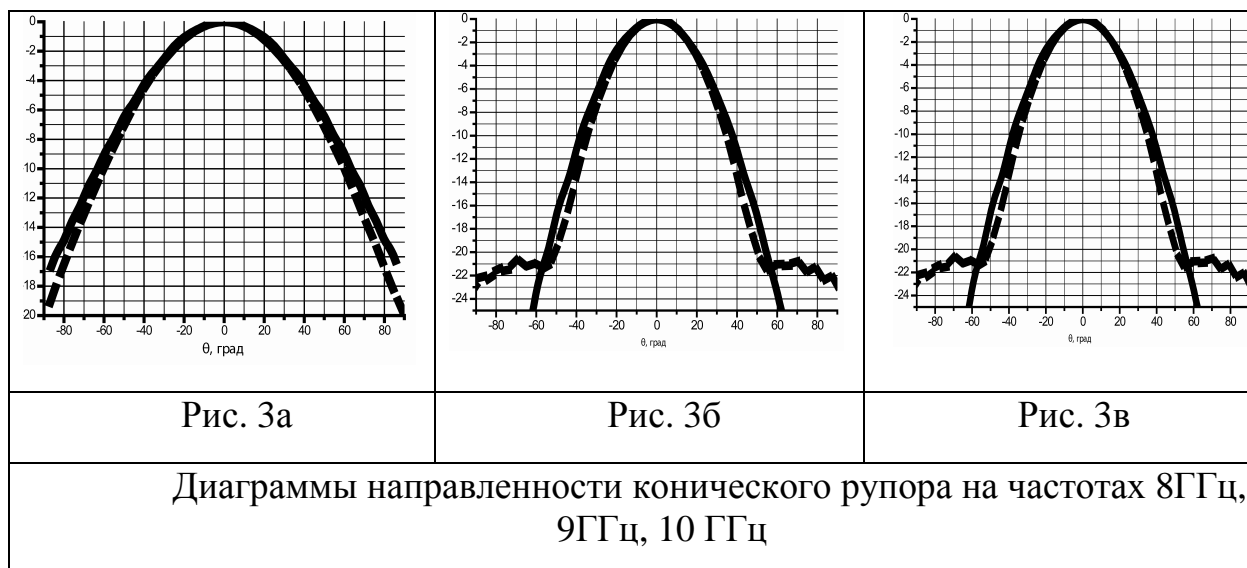


Рис. 2. Конический рупорный облучатель

Диаграмма направленности конического рупорного облучателя имеет косинусоидальную форму и различается в E и H плоскостях до 20° в зависимости от частоты. При этом неравномерность поля в апертуре зеркала коллиматора составляет ~ 2 дБ в полосе частот 40%. Уровень поля на кромках ($\pm 40^{\circ}$) меняется от -5 дБ до -12 дБ. На рис. 3а-3в представлены расчетные (сплошная кривая) и экспериментальные (пунктир) нормированные на максимальное значение диаграммы направленности в плоскости E .



Конические облучатели считаются достаточно широкополосными, однако они не обеспечивают желаемого снижения амплитуды поля к краям зеркала и имеют сильное излучение назад.

Частично указанные недостатки устранены в конических облучателях с обратным гофрированным фланцем. Облучатели этого типа имеют диаграмму направленности, обеспечивающую более равномерную засветку поверхности рефлектора в центральной части при большем, чем у конического облучателя, снижении амплитуды поля к краям зеркала.

Облучатель с обратным фланцем (Рис. 4) представляет собой ребристый обратный фланец, запитываемый круглым волноводом с волной H_{11} .

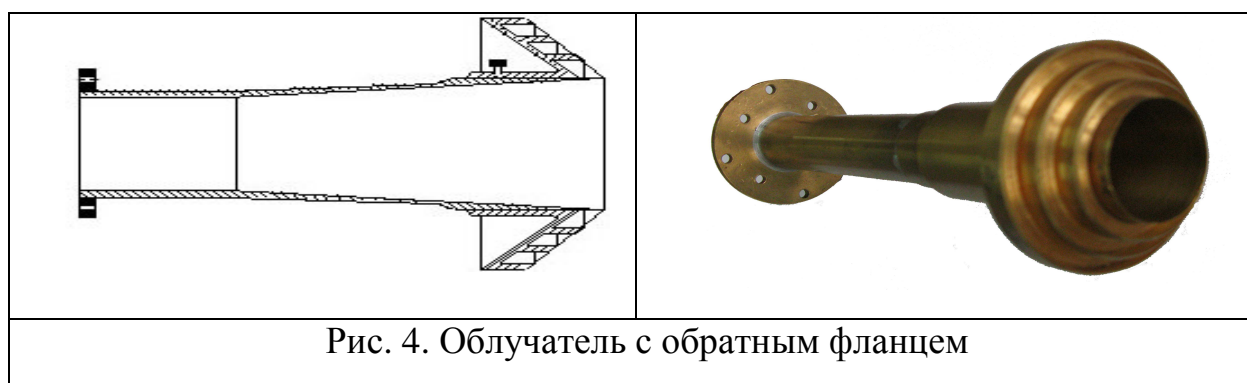
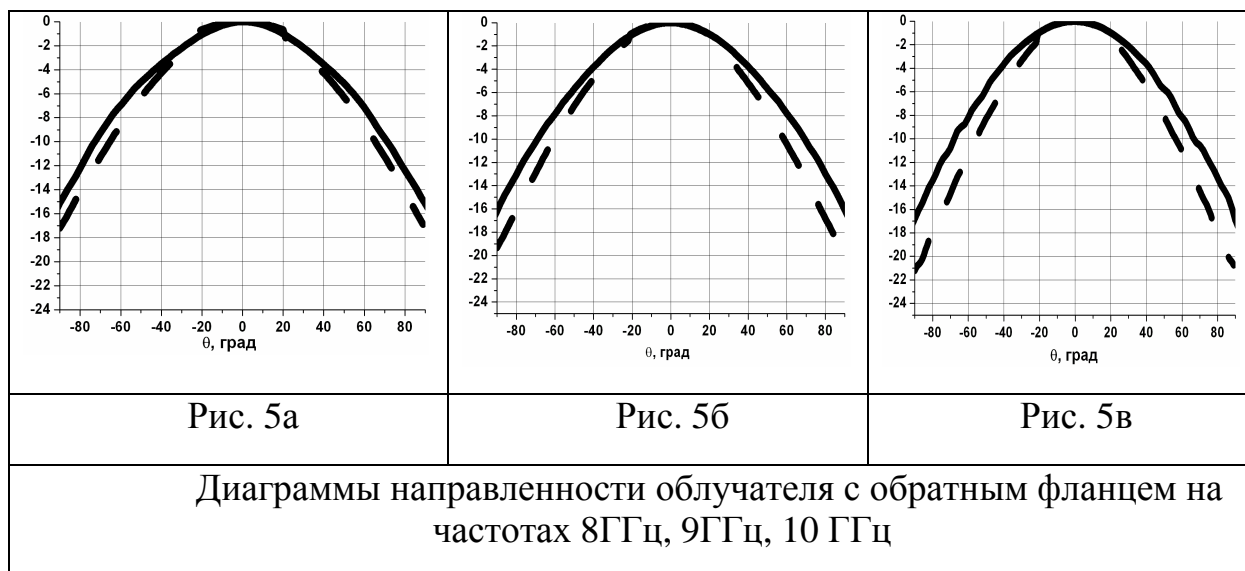
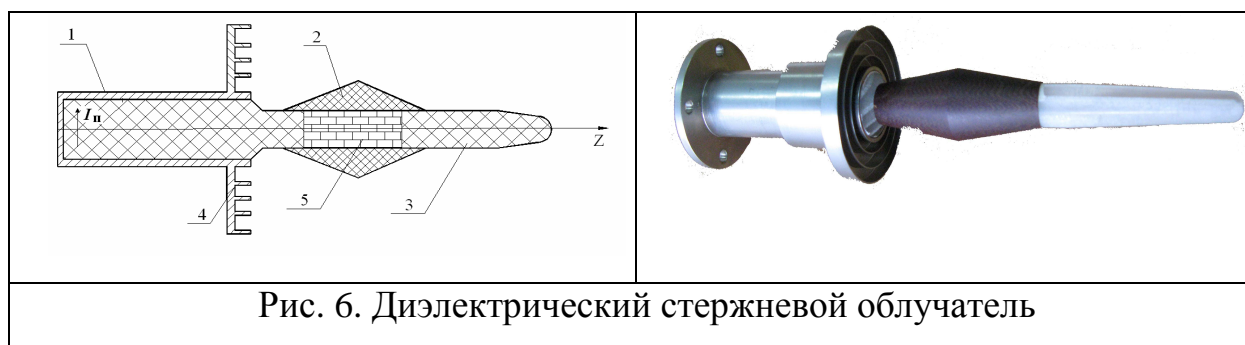


Диаграмма направленности такого облучателя имеет форму близкую к косинусоидальной и симметрична в плоскостях E и H . Такой облучатель обладает неравномерностью поля в апертуре зеркала коллиматора ~ 2 дБ в полосе частот 40%. Однако, при этом достаточно сильно засвечиваются кромки зеркала коллиматора. Уровень поля на кромках зеркала коллиматора ($\pm 40^\circ$) меняется с частотой от -3 дБ до -5 дБ. Диаграммы направленности представлены на рис. 5а-5в.



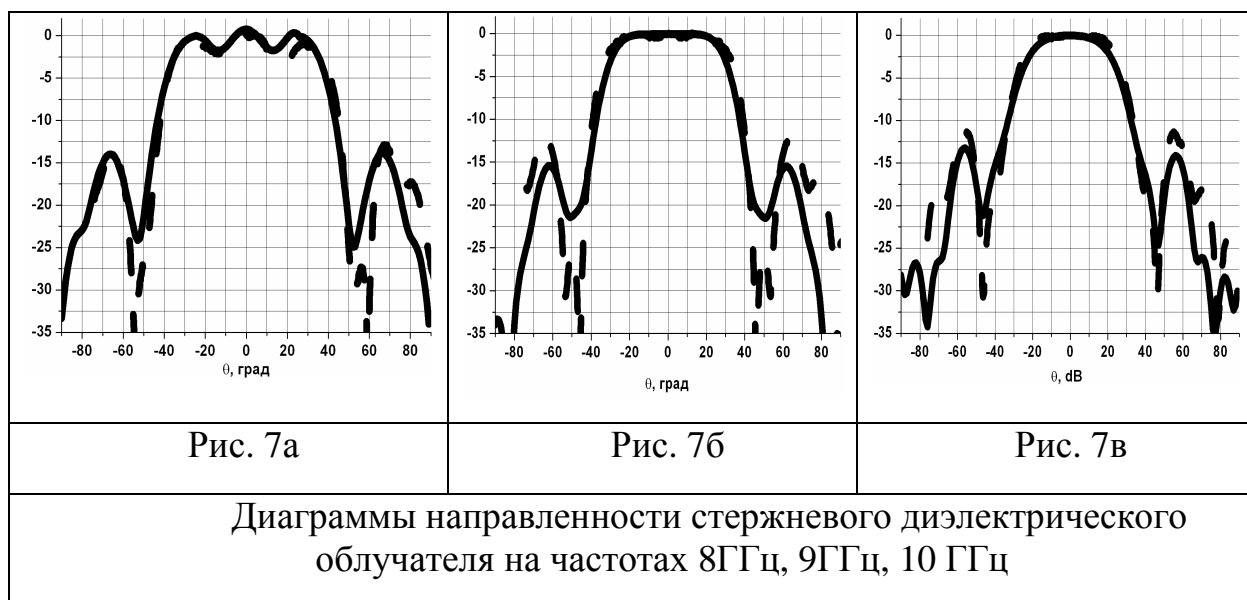
Диэлектрический стержневой облучатель

Диэлектрический стержневой облучатель (Рис.6) состоит из диэлектрического стержня (3), диэлектрической биконической втулки (2), ребристого фланца (4), круглого волновода (1), который запитывается волной H_{11} . ДН такого облучателя может быть представлена как сумма ДН стержня, которая осесимметрична и имеет максимум в направлении оси стержня и ДН втулки, которая имеет воронкообразную форму с минимумом в направлении указанной оси. Относительная диэлектрическая проницаемость материала стержня $\epsilon_1=2.55$ (полистирол) и относительная диэлектрическая проницаемость биконической втулки $\epsilon_2 =4.5$ (текстолит). При отработанных размерах стержня и биконической втулки, а так же тщательной фазировке всех элементов облучателя можно получить оптимальную по форме ДН со столообразной вершиной на уровне 1 дБ в E и H плоскостях в полосе частот $\pm 7\%$. Для увеличения широкополосности применяется фторопластовая вставка 5 [4]. Относительная диэлектрическая проницаемость вставки $\epsilon_{вс} =2$.



Результаты расчетов ДН - сплошная кривая стержневого диэлектрического облучателя показаны на Рис. 7а-7в. Пунктирной кривой представлены экспериментальные ДН диэлектрического стержневого облучателя. Как показывает сравнение расчетных и экспериментальных ДН

облучателя наблюдается хорошее совпадение в области главного лепестка ДН. Уровень первых боковых лепестков расчетных и экспериментальных ДН стержневого диэлектрического облучателя может отличаться на отдельных частотах до 3 дБ, отличие в ширине ДН облучателя на уровне -15 дБ доходит до 3 градусов.



Круглый двухслойный магнитоэлектрический волновод

В данной главе продемонстрирована возможность создания широкополосного облучателя на примере круглого двухслойного волновода, стенки которого состоят из искусственного магнитоэлектрика [5].

Геометрия облучателя представлена на рис. 8. Трубка круглого сечения 2 из искусственного магнитоэлектрика, возбуждается коническим рупором 1. Фотография рупора и листового образца искусственного магнитоэлектрика показана на рис. 8, справа.



Искусственный магнитоэлектрик представляет собой композитный листовый материал на основе упорядоченной однородной смеси право- и

левозакрученных проволочных спиралей, приклеенных на тонкую полиуретановую подложку толщиной 0,2 мм. Оси всех спиралей были ориентированы параллельно подложке. Концентрация право- и левозакрученных спиралей одинакова. Оси спиралей ориентировались в двух взаимно ортогональных направлениях. Толщина образца составляла 2,2 мм.

Проволочные спирали были изготовлены из высокоомного изолированного манганинового провода диаметром 0,05 мм. Отдельные спирали длиной 2 мм имели 2 витка провода, намотанных с шагом 0,9 мм на отрезок цилиндрической диэлектрической трубки с внешним диаметром 1,8 мм и внутренним диаметром 0,5 мм. В качестве трубки использовалась упрочненная трубка из радиационно-сшитого полиэтилена. Проволочная спираль фиксировалась на трубке с помощью отверждаемой пленки полиуретана. Эффективные материальные параметры композита в диапазоне частот 6-16 ГГц приведены на рис.9 а,б.

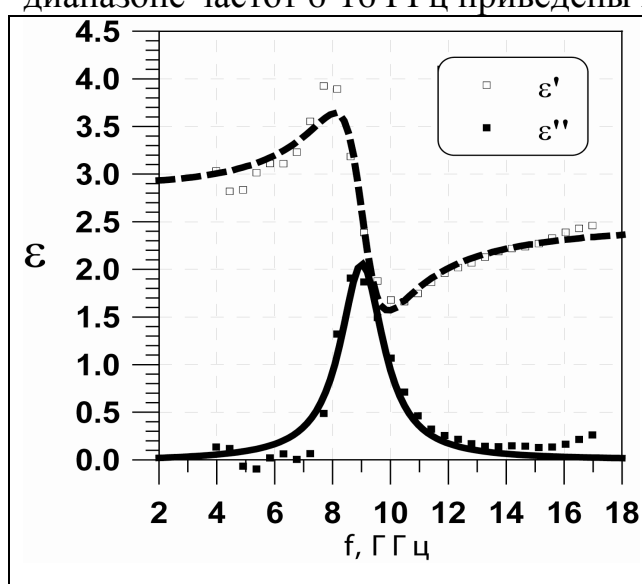


Рис. 9а. Зависимость эффективных значений диэлектрической проницаемости искусственного магнитодиэлектрика от частоты

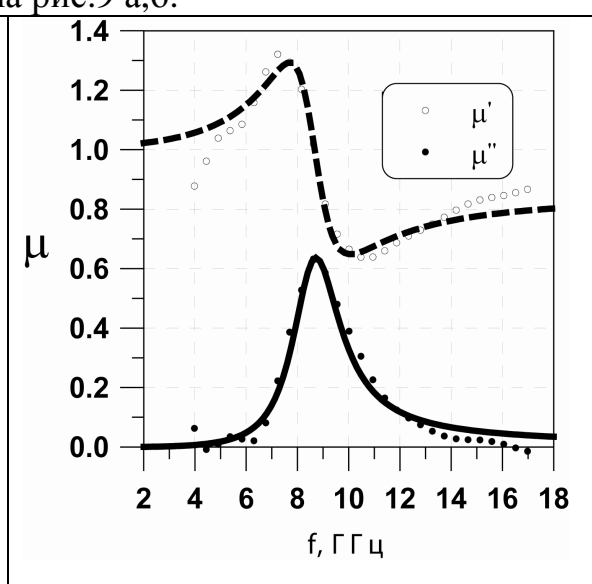
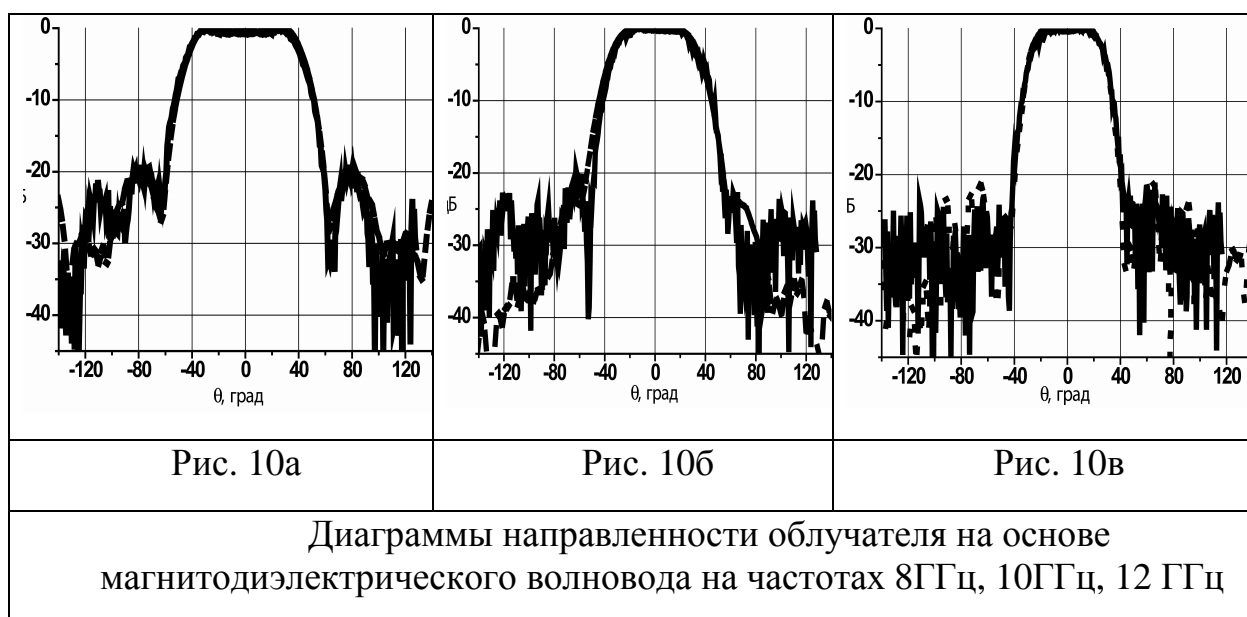


Рис. 9б. Зависимость эффективных значений магнитной проницаемости искусственного магнитодиэлектрика от частоты

Благодаря частотной дисперсии материальных параметров магнитодиэлектрика, можно обеспечить малое изменение фазовой скорости распространения электромагнитных волн в таком волноводе с частотой и тем самым обеспечить слабое изменение главного лепестка диаграммы направленности в некотором диапазоне углов и формирование диаграмм направленности специальной формы.

На Рис. 10а-10в представлены результаты расчетов диаграмм направленности антенны на основе двухслойного магнитодиэлектрического волновода (сплошная кривая) в диапазоне частот 8- 12 ГГц в азимутально-угловой плоскости. В расчете, материальные параметры магнитодиэлектрика использовались из графиков 9а,б. Размеры антенны обозначены на Рис. 8. Экспериментально снятые в безэховой камере диаграммы направленности, на Рис. 10а-10в, изображены пунктирными кривыми. Сравнение

экспериментальных и расчетных данных показывает хорошее совпадение в области главного лепестка. Расхождение в области боковых лепестков не превышает 5 дБ.



В области частот 8-12 ГГц, главный лепесток диаграммы направленности имеет столообразную форму в секторе углов $\pm 28^\circ$. Уровень боковых лепестков ниже -20 дБ и уменьшается с частотой.

Таким образом, использование магнитодиэлектрика в качестве элемента волноводной антенны позволяет получить диаграммы направленности столообразной формы и низким уровнем боковых лепестков в широком диапазоне частот.

Поля в рабочей зоне коллиматора

На рис. 11а-11в представлены результаты численного моделирования методом физической оптики [6] полей в рабочей зоне формируемых коллиматором, при облучении зеркала каждым из описанных выше облучателей в диапазоне частот в горизонтальном и вертикальном срезах рабочей зоны. Причем черный цвет соответствует распределению поля в случае облучения коническим рупорным облучателем, красный – облучателем с обратным фланцем, зеленый- стержневым диэлектрическим облучателем и синий- облучателем на основе круглого магнитодиэлектрического волновода.

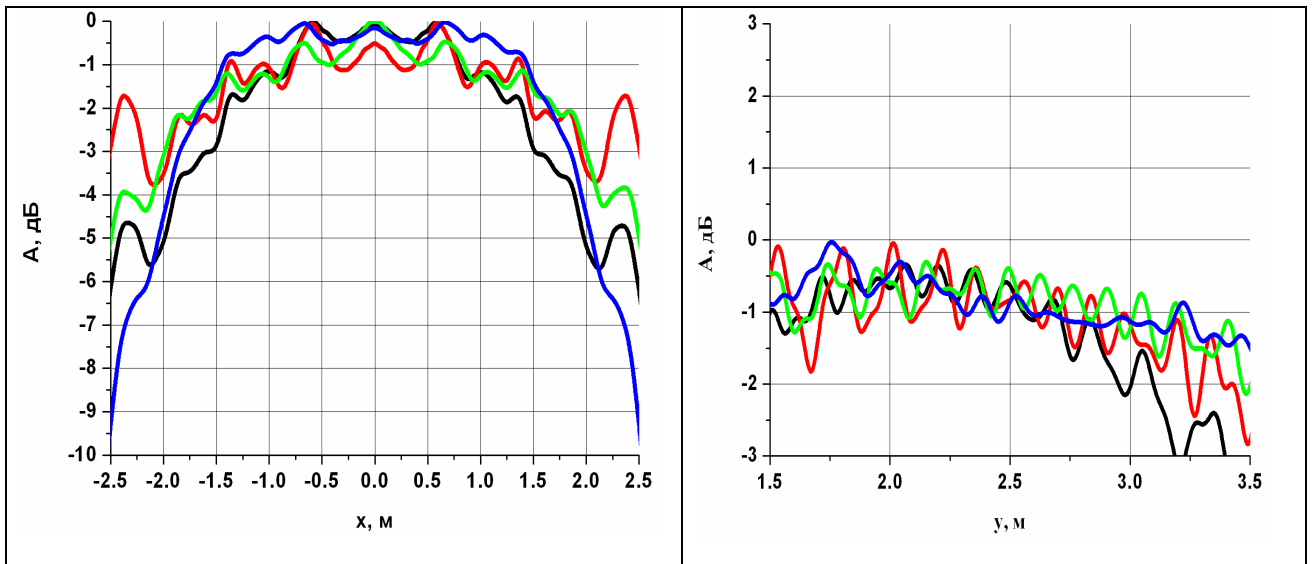


Рис. 11 а. Распределение поля E в рабочей зоне в горизонтальном и вертикальном срезях. Частота 8 ГГц.

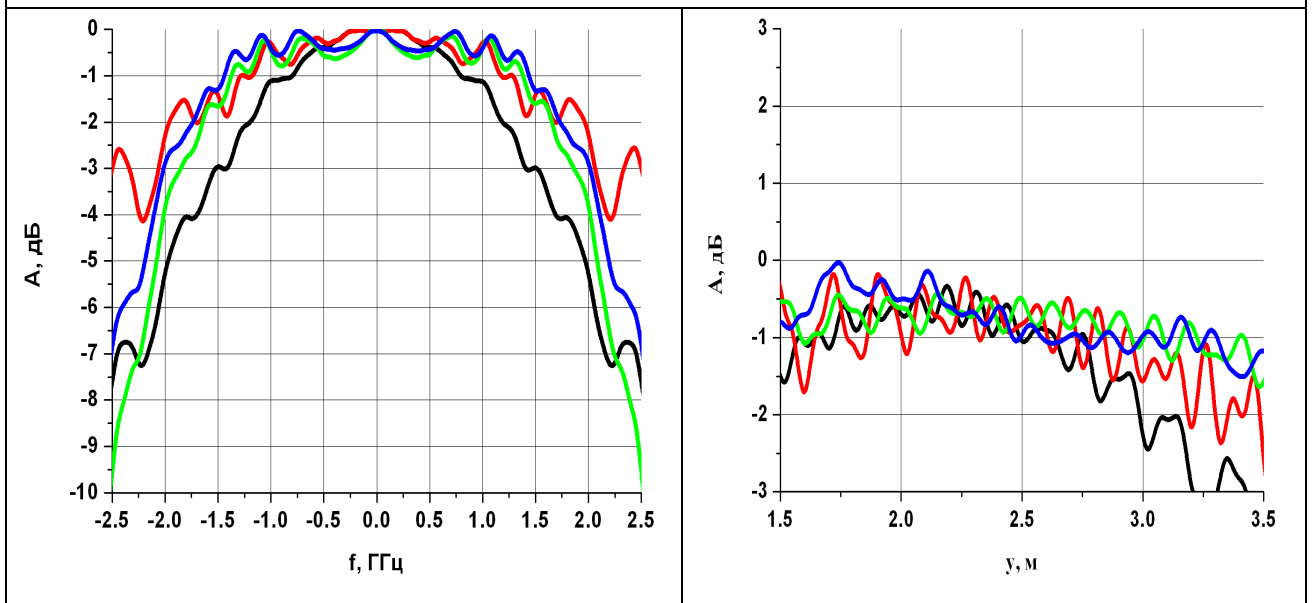


Рис. 11 б. Распределение поля E в рабочей зоне в горизонтальном и вертикальном срезях. Частота 9 ГГц.

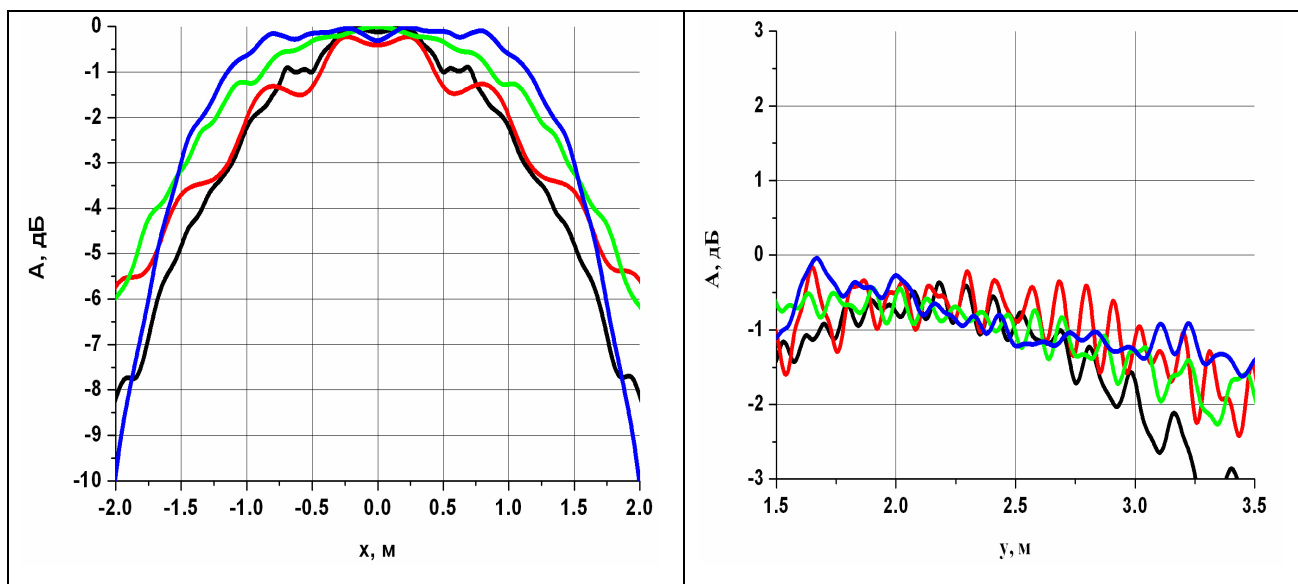


Рис. 11 в. Распределение поля E в рабочей зоне в горизонтальном и вертикальном срезах. Частота 10 ГГц.

Как видно из графиков (Рис. 11а-11в) неравномерность поля менее 1 дБ сохраняется в узкой области рабочей зоны, которая сужается с ростом частоты. К тому же распределение полей носят осциллирующий характер, связанный в основном с дифракцией на кромках зеркала коллиматора. И чем меньше возбуждаются кромки зеркала коллиматора полем облучателя, тем меньше осцилляции наблюдаются в рабочей зоне коллиматора. Самые быстрые осцилляции возникают при возбуждении зеркала облучателем с обратным фланцем. Уровень поля на кромках зеркала коллиматора в этом случае достигает -4 дБ. При возбуждении коническим облучателем уровень поля на кромках зеркала ниже -6 дБ. Облучатель на основе магнитоэлектрического волновода вносит в поле рабочей зоны наименьшие осцилляции, благодаря низкому уровню поля на кромках зеркала (ниже -20 дБ).

При облучении зеркала коллиматора диаграммой направленности близкой к столообразной форме наблюдается плавно меняющаяся составляющая поля в рабочей зоне. Такими диаграммами обладают диэлектрический стержневой облучатель и облучатель на основе магнитоэлектрического волновода.

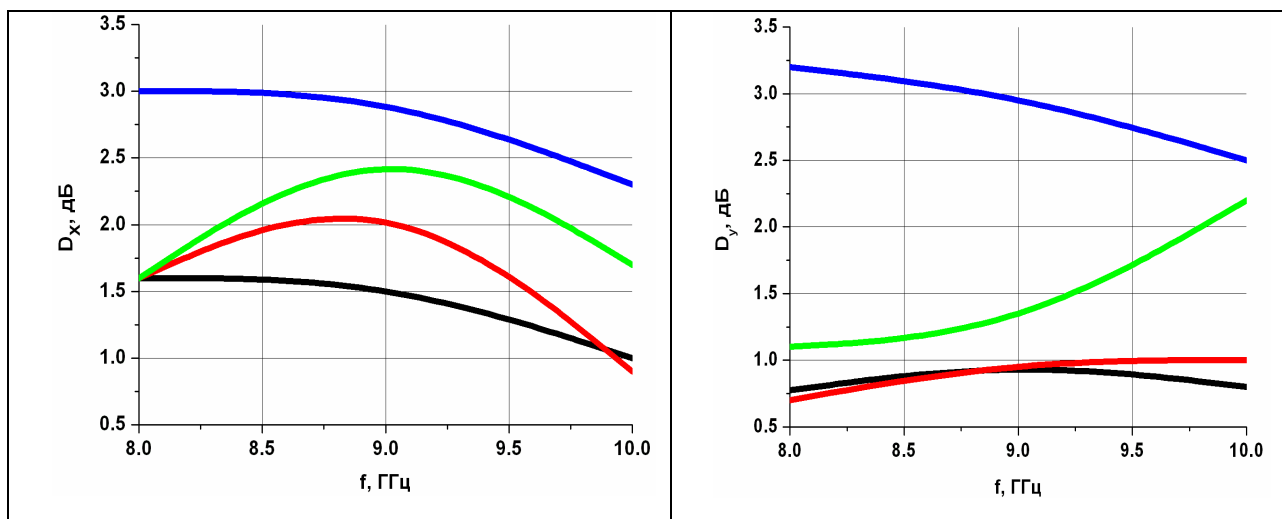


Рис. 12 Ширина рабочей зоны в горизонтальном и вертикальном срезе в зависимости от частоты

Наряду с Рис. 12 представлены зависимости ширины рабочей зоны D от частоты для облучателей представленных выше, в плоскостях X , Y . Анализ графиков показывает, что наибольшая рабочая зона наблюдается при использовании облучателя на основе круглого двухслойного магнитоэлектрического волновода. В то время как стандартный конический облучатель имеет наименьшую рабочую зону в диапазоне частот от 8 до 10 ГГц. Облучатель с обратным фланцем имеет немного большие размеры рабочей зоны и его применение более предпочтительно, благодаря низкому уровню заднего излучения. Стержневой диэлектрический облучатель по своим характеристикам находится посередине между облучателем с обратным фланцем и облучателем на основе круглого двухслойного магнитоэлектрического волновода. Т.о. наибольшая равномерность поля в рабочей зоне достигается при облучении зеркала коллиматора диаграммой направленности столообразной формы с неравномерностью вершины главного лепестка не более 1 дБ в секторе углов $\pm 20^\circ$ и амплитудой на краях зеркала ниже -10 дБ, в широком диапазоне частот. Изготовление стержневого диэлектрического облучателя и облучателя на основе круглого магнитоэлектрического волновода имеет высокую стоимость, и применение их рекомендуется в исключительных случаях, например при измерении ЭПР.

Таким образом, в работе исследованы поля в рабочей зоне коллиматора в зависимости от применяемых облучателей. Показано, что распределение поля в рабочей зоне коллиматора зависит от двух составляющих. Первая составляющая связана с полем облучателя. Эта составляющая тем равномернее, чем ближе форма главного лепестка диаграммы направленности облучателя к столообразной. Вторая составляющая связана с уровнем поля облучателя на краях зеркала коллиматора. Эта дифракционная составляющая вносит осциллирующий характер в распределение поля. Чем меньше уровень поля на краях зеркала

коллиматора, тем более гладкое распределение поля формируется в рабочей зоне.

Показаны сравнительные характеристики облучателей и полей. Приведены рекомендации по выбору облучателей коллиматора.

Список литературы

1. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С., Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов. М.: Наука, 2007
2. Lee T.H., Burnside W.D.//IEEE Trans. 1996. V. AP-44. № 1. P. 87
3. Коллиматор МАК-5М. Конструкция и технические характеристики. Балабуха Н.П., Зубов А.С., Солосин В.С., Федоров С.А.//Радиотехника и электроника, 2009, том 54, №5
4. Стержневой диэлектрический облучатель с расширенной полосой рабочих частот. Балабуха Н.П., Башарин А.А.- Антенны, 2008, №12, стр. 65
5. Излучение из открытого конца полубесконечного круглого двухслойного магнитодиэлектрического волновода. Балабуха Н.П., Башарин А.А., Семененко В.Н.- Антенны, 2009, №6, принято в печать
6. Кюн Р. Микроволновые антенны. М.: Судостроение, 1967