

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПОЛИКОНИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

М. Д. Дупленкова^{1,2}, В. И. Калинин¹, В. А. Калошин^{1,3}

¹ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, ² ОКБ МЭИ, ³ МФТИ

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2015 г.

Аннотация. Предложена и исследована цилиндрическая антенная решетка на основе излучателей в виде вырезки из поликонической антенны. Численное моделирование и оптимизация для обеих поляризаций проведена на основе метода конечных элементов. Приведены результаты экспериментального исследования фрагмента решетки. Результаты исследования показали возможность согласования двумерной решетки в полосе частот порядка 1:100.

Ключевые слова: сверхширокополосный излучатель, антенная решетка, численное моделирование, согласование, диаграмма излучения.

Abstract. A cylindrical array based on radiators in the form of the cutting from a polyconic antenna is proposed and studied. Numerical simulation and optimization for both polarizations was performed using the finite element method. The results of the experimental study of a fragment of the array are presented. The results show the possibility of the array matching in the frequency band of 1: 100.

Key words: UWB radiator, antenna array, numerical modeling, matching, radiation pattern.

Введение

В работах [1,2] были предложены и исследованы в сверхширокой полосе частот поликонические излучатели. В работе [3] проведен анализ коллинеарной сверхширокополосной (СШП) антенной решетки из поликонических элементов. В работе [4] были предложены и исследованы СШП излучатели на основе вырезки из поликонического элемента. В работе [5] исследованы фрагменты СШП кольцевой антенной решетки из таких излучателей.

Коллинеарная и кольцевая антенные решетки являются одномерно-периодическими системами и позволяют проводить обзор пространства в полном азимутальном угле. Их недостатком является сравнительно низкая направленность.

Целью данной работы является исследование цилиндрической СШП антенной решетки из элементов на основе вырезки из поликонического излучателя. Рассмотрены два варианта решеток (с параллельной и перпендикулярной оси решетки поляризацией электрического поля) и два типа поликонических излучателей (с разными углами вырезки).

На основе метода конечных элементов разработаны численные модели и рассчитаны характеристики согласования и излучения 9 элементных фрагментов двумерно-периодической цилиндрической антенной решетки в сверхширокой полосе частот. Изготовлены два фрагмента из трех поликонических излучателей и приведены результаты измерения согласования центральных элементов фрагментов в полосе частот от 0.01 до 20 ГГц.

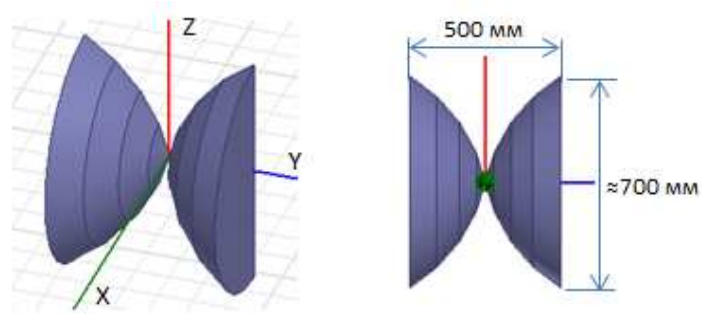
1. Антенная решетка из элементов на основе 180 градусной вырезки поликонического излучателя

1.1. Фрагмент цилиндрической антенной решетки с горизонтальной поляризацией поля

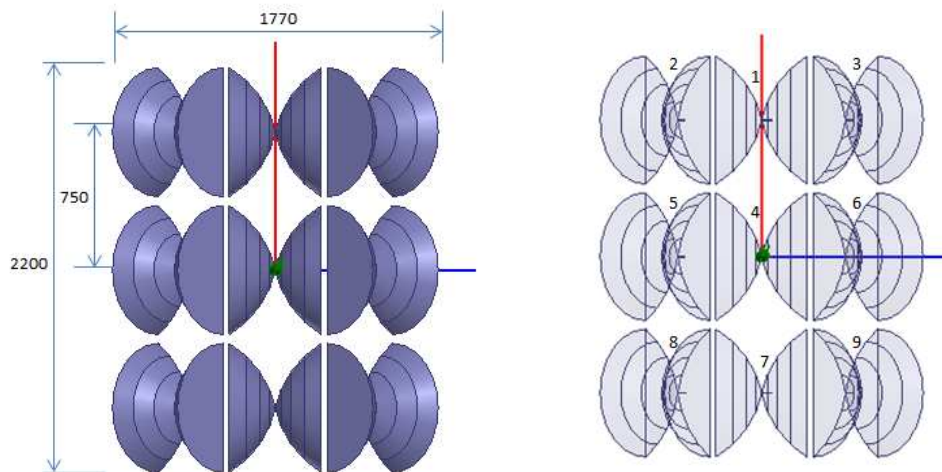
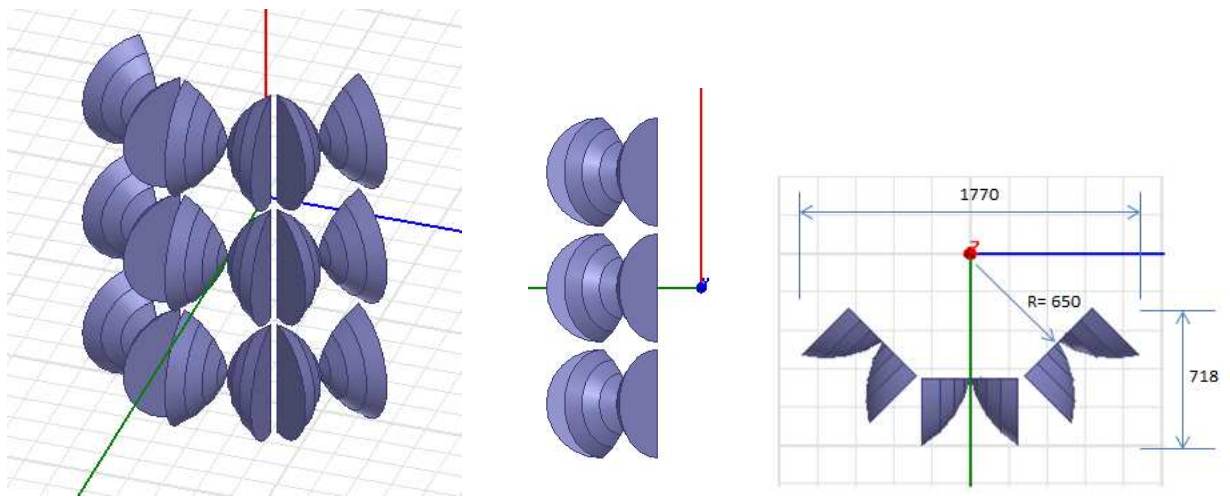
На рис. 1 показана модель поликонического излучателя [4], а также фрагмента цилиндрической антенной решетки 3x3 из таких излучателей, основные размеры и нумерация входов элементов. Поверхность фрагмента имеет форму цилиндра радиуса 650 мм, высота – 2200мм. Вектор электрического поля диаграммы направленности решетки лежит в азимутальной (горизонтальной) плоскости XY.

Результаты расчета коэффициента отражения от входа центрального элемента фрагмента решетки при согласовании остальных входов в диапазоне частот до 2 ГГц представлены на рис. 2 сплошной линией. Уровень согласования становится ниже уровня -10 дБ на частотах выше 130 МГц. Для сравнения штриховой линией обозначена характеристика согласования

излучателя в свободном пространстве.



(a)



(б)

Рис. 1. Модели излучателя (а) и фрагмента цилиндрической антенной решетки 3x3 (б). Цифрами обозначены номера входов.

Результаты расчета коэффициента отражения от входа центрального элемента фрагмента решетки при согласовании остальных входов в диапазоне частот до 2 ГГц представлены на рис. 2 сплошной линией. Уровень согласования становится ниже уровня -10 дБ на частотах выше 130 МГц. Для сравнения штриховой линией обозначена характеристика согласования излучателя в свободном пространстве.

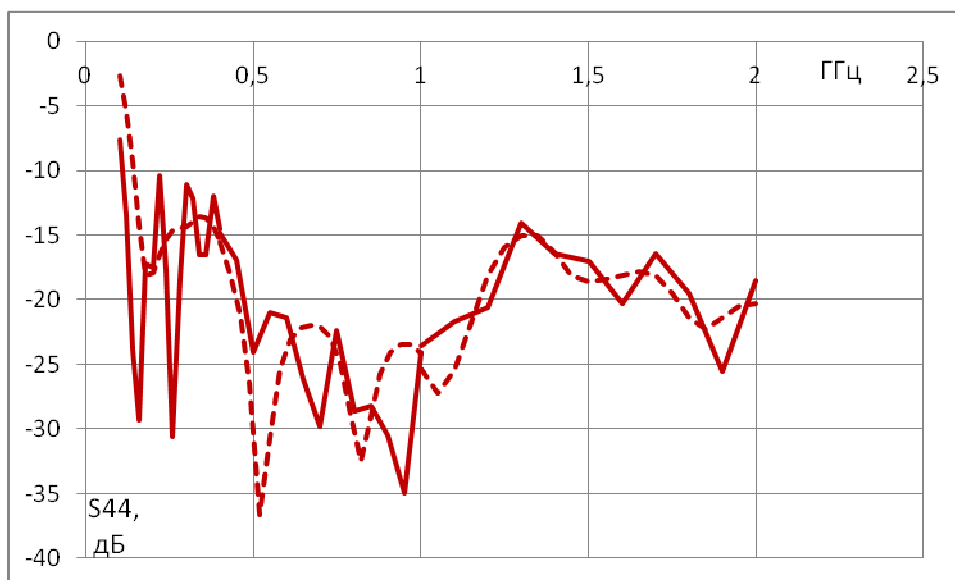


Рис.2. Частотная зависимость коэффициента отражения центрального элемента фрагмента решетки при согласованных остальных входах (сплошная линия) и согласование излучателя в свободном пространстве (штриховая линия).

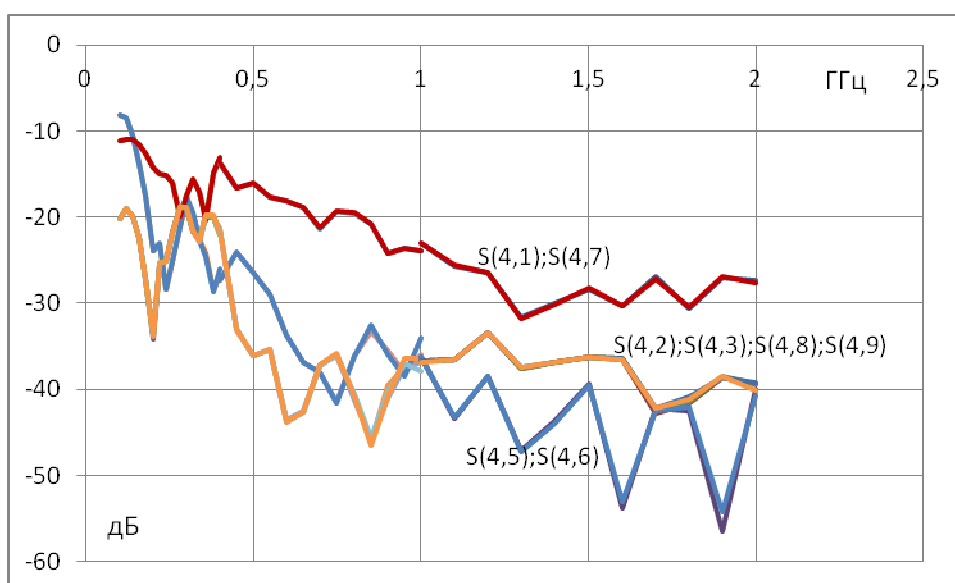
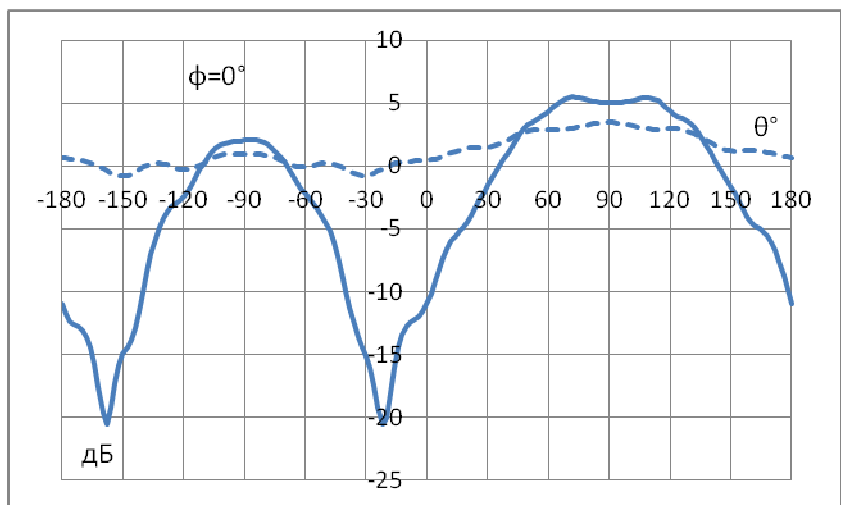
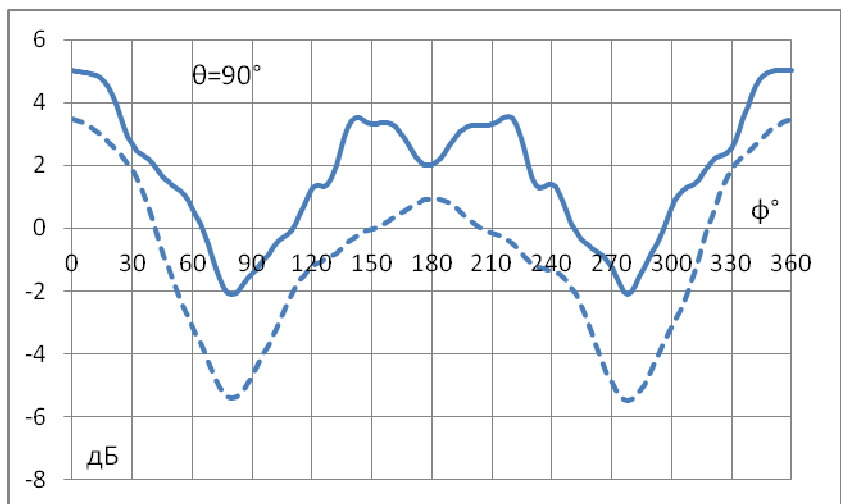
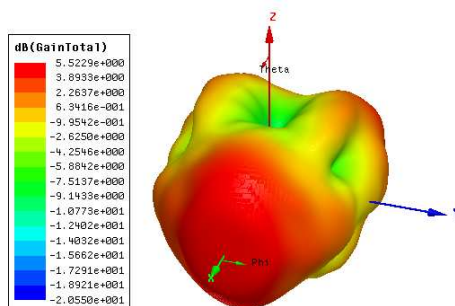
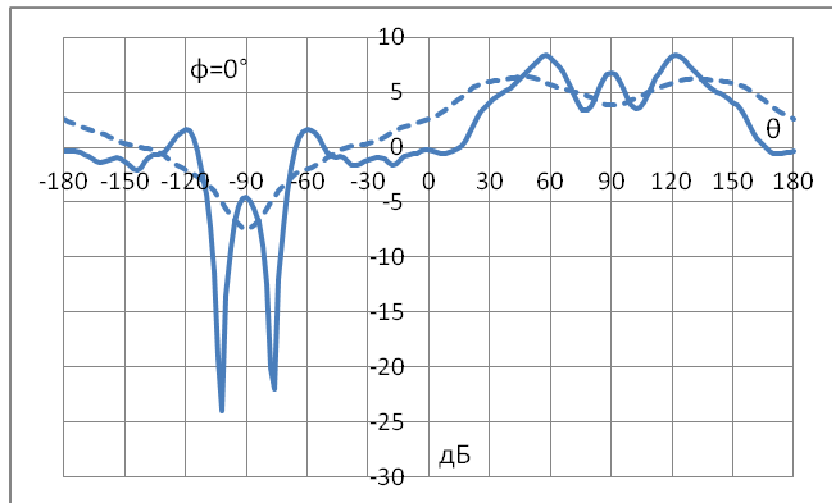
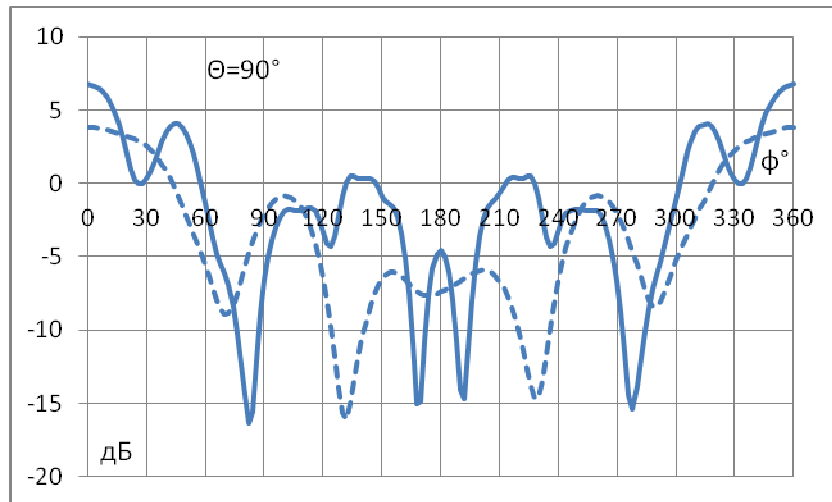
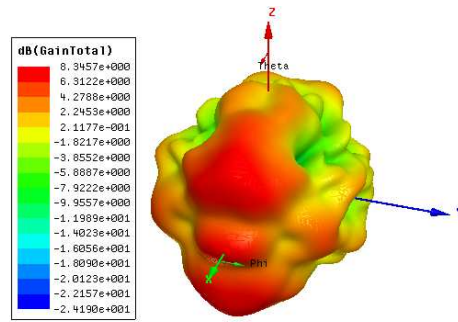


Рис.3. Частотные зависимости коэффициентов взаимной связи центрального элемента с остальными элементами фрагмента решетки.

Различие двух кривых (сплошная кривая осциллирует вокруг пунктирной) объясняется электромагнитной связью между элементами в решетке. Коэффициенты связи центрального элемента с другими элементами показаны на рис. 3. Как видно на рисунке, они достаточно быстро убывают с ростом частоты.



F= 0.25 ГГц



$F = 0.7 \text{ ГГц}$

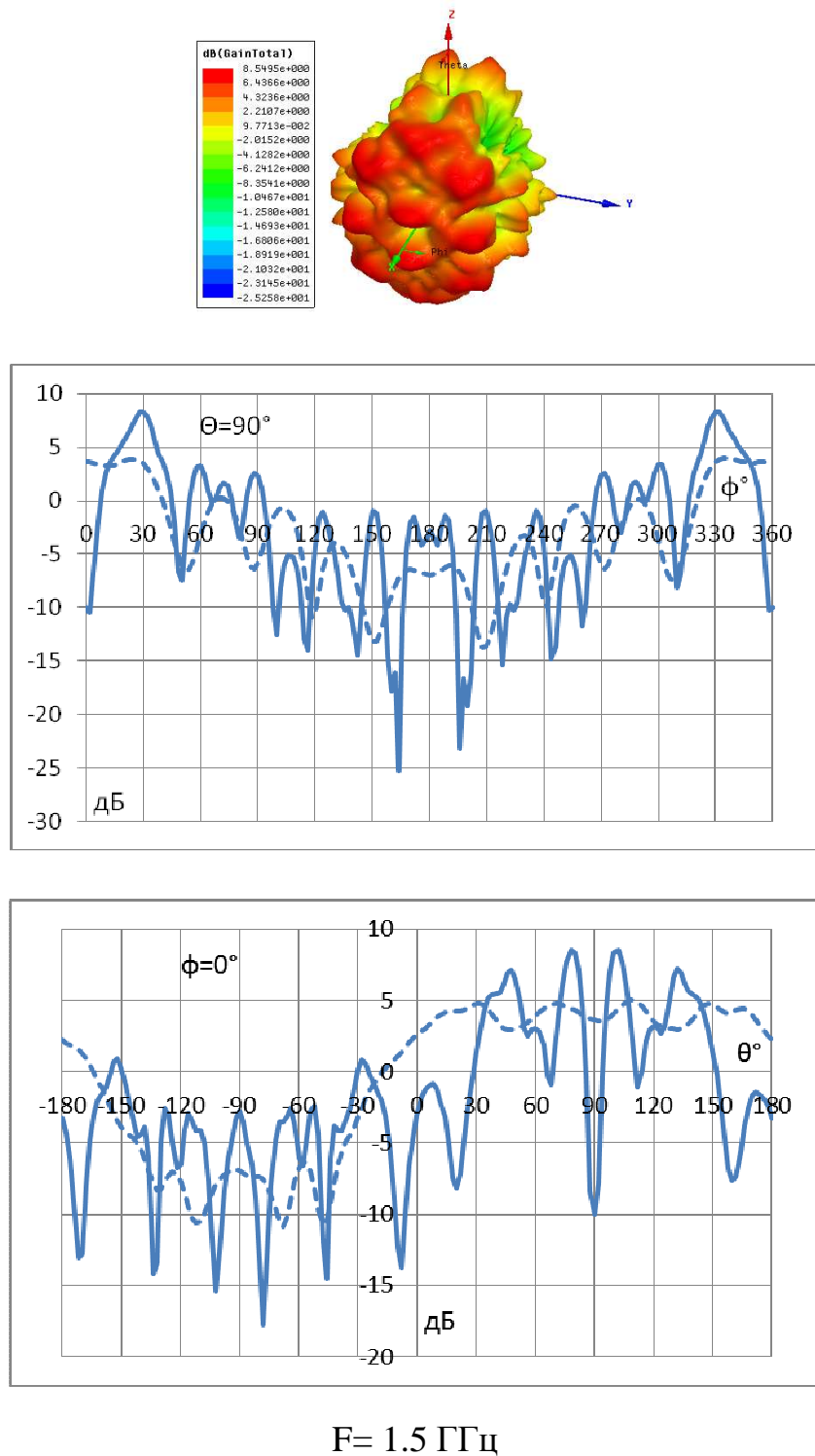


Рис. 4. Диаграммы направленности в пространстве и в двух плоскостях центрального элемента в решетке при согласованных остальных входах (сплошная линия) и поликонического излучателя (штриховая линия).

Рассмотрим характеристики излучения элемента решетки на разных частотах. На рис. 4 представлены рассчитанные ненормированные диаграммы направленности (угловые зависимости коэффициента усиления) центрального

элемента фрагмента решетки при согласованных остальных входах. Показаны трехмерная диаграмма в пространстве и сечения в двух плоскостях $\Theta=90^\circ$ (плоскость XY) и $\varphi=0^\circ$ (плоскость XZ) на трех частотах 0.25 ГГц, 0.7 ГГц и 1.5 ГГц. Штриховыми линиями обозначены соответствующие диаграммы направленности для излучателя в свободном пространстве. Отличие диаграмм направленности излучателя и элемента в решетке также обусловлено взаимной электромагнитной связью элементов, при которой к излучению центрального элемента добавляется излучение токов, наводимых на соседних элементах и наоборот. С ростом частоты диаграмма излучения становится неравномерной со значительными колебаниями коэффициента усиления в зависимости от угла.

На рис.5 представлены рассчитанные распределения амплитуды электрического поля в двух плоскостях в ближней зоне фрагмента решетки на разных частотах. Наглядно проявляется изменение характера ближнего поля в соответствии с изменением степени неравномерности диаграмм излучения на рис. 4.

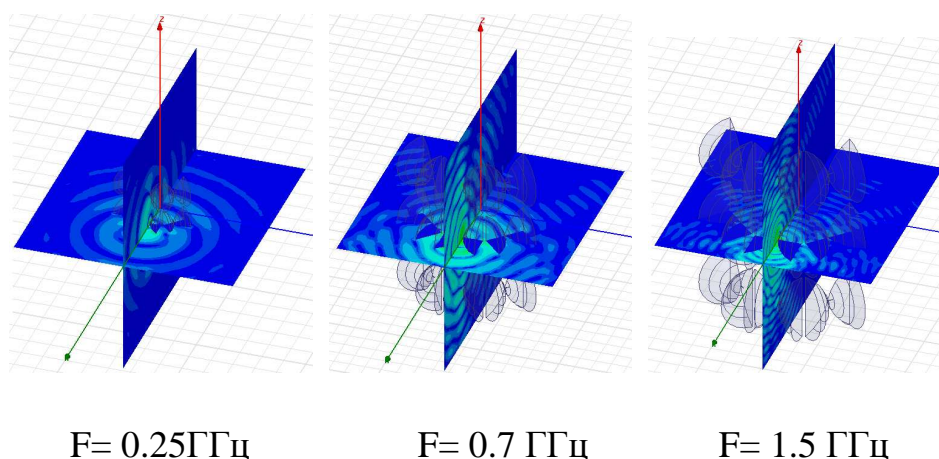


Рис. 5. Распределение амплитуды электрического поля в двух плоскостях в ближней зоне фрагмента решетки при возбуждении центрального элемента и согласованных остальных элементах.

1.2. Фрагмент цилиндрической антенной решетки с вертикальной поляризацией поля

Сравним рассмотренную антенную решетку с аналогичной решеткой, в которой элементы повернуты на 90° и расположены так, как показано на рис. 6. В этом случае вектор электрического поля диаграммы направленности решетки лежит в угломестной (вертикальной) плоскости.

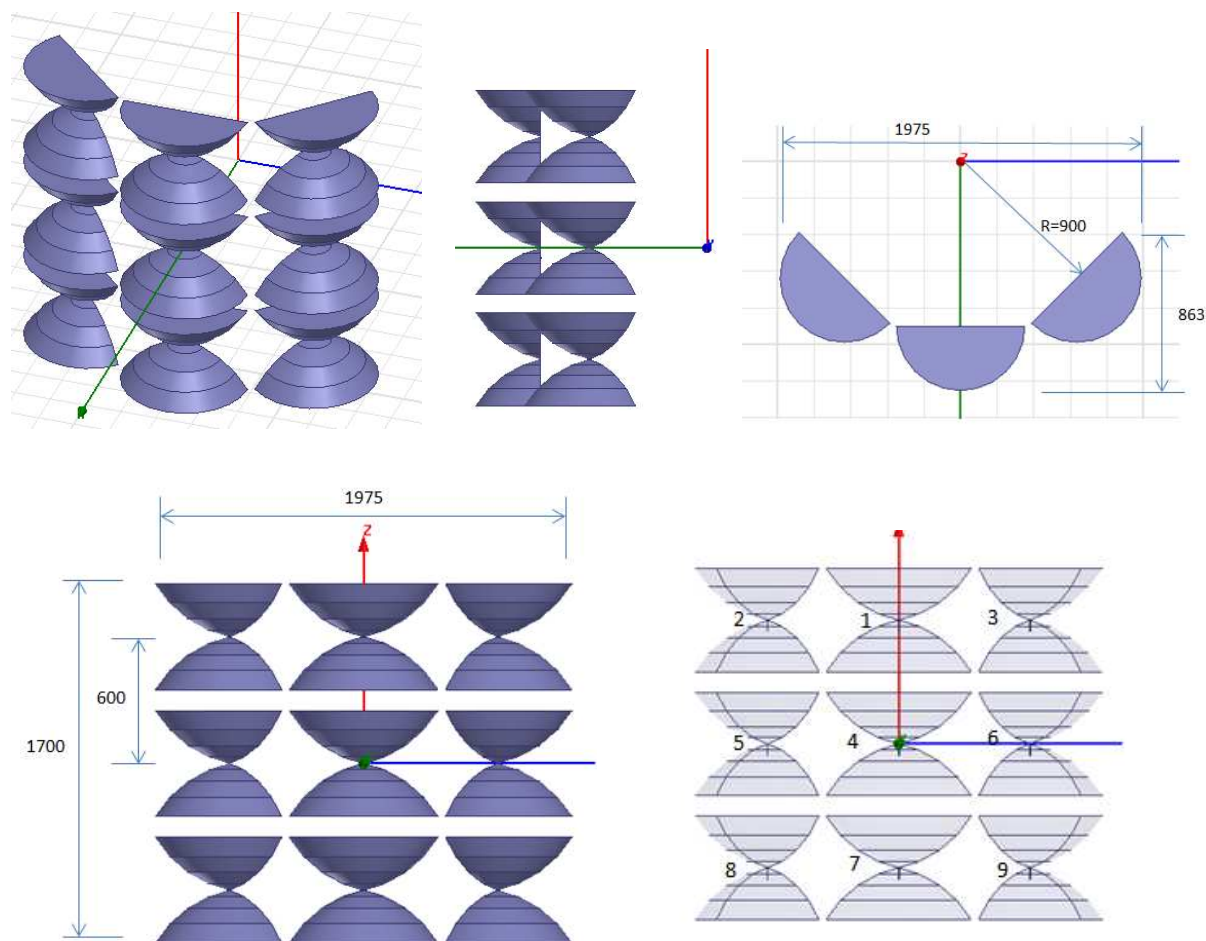


Рис. 6. Модель антенной решетки 3x3.

Характеристика согласования центрального элемента решетки при согласованных остальных входах показана на рис. 7, на котором штриховая линия, как и на рис. 2, обозначает коэффициент отражения излучателя. Так же, как и в предыдущем случае, уровень согласования становится ниже -10 дБ на частотах выше 130 МГц. Коэффициенты взаимной связи центрального элемента и соседних элементов в данной решетке показаны на рис. 8. На частотах выше 0.5 ГГц они не превышает -20 дБ.

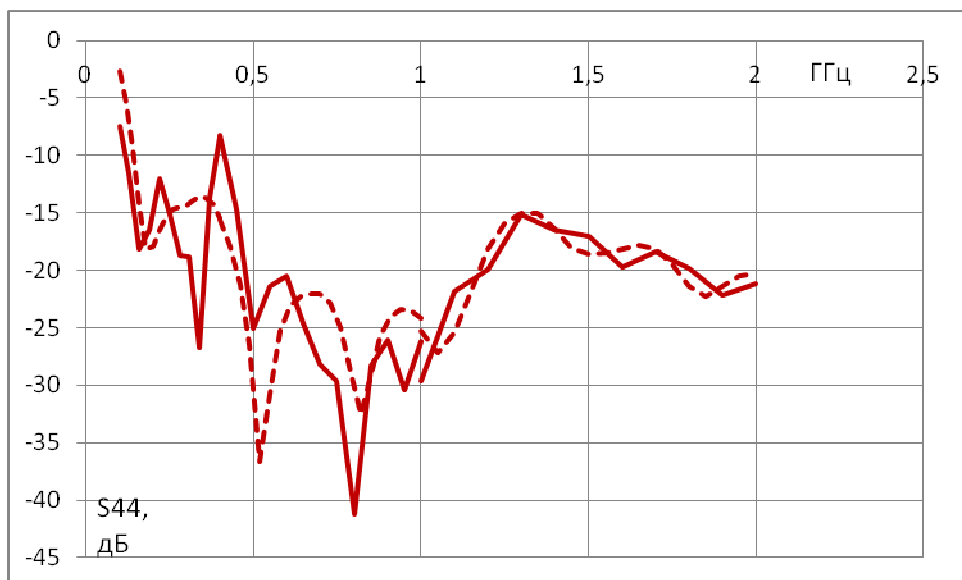


Рис. 7. Частотная зависимость коэффициента отражения центрального элемента решетки при согласованных остальных входах (сплошная линия) и поликонического излучателя (штриховая линия).

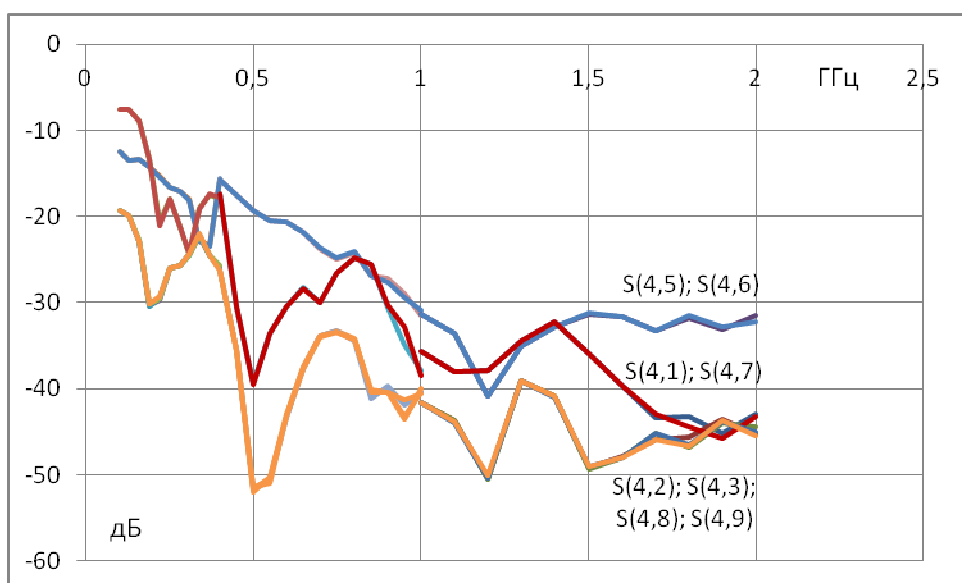
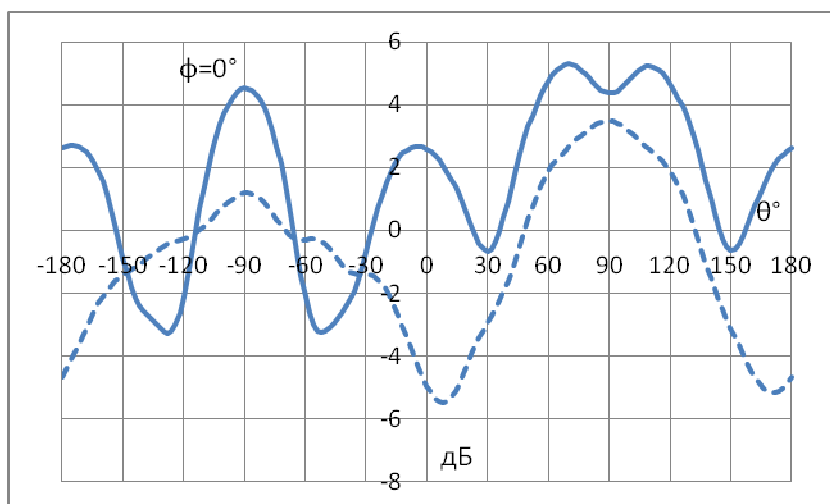
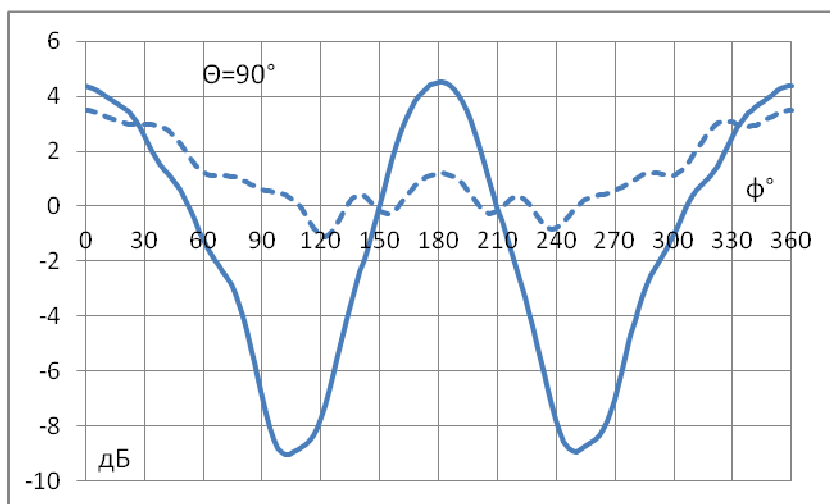
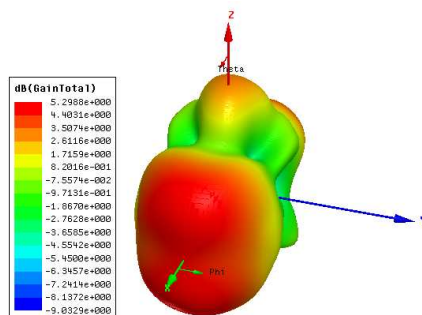


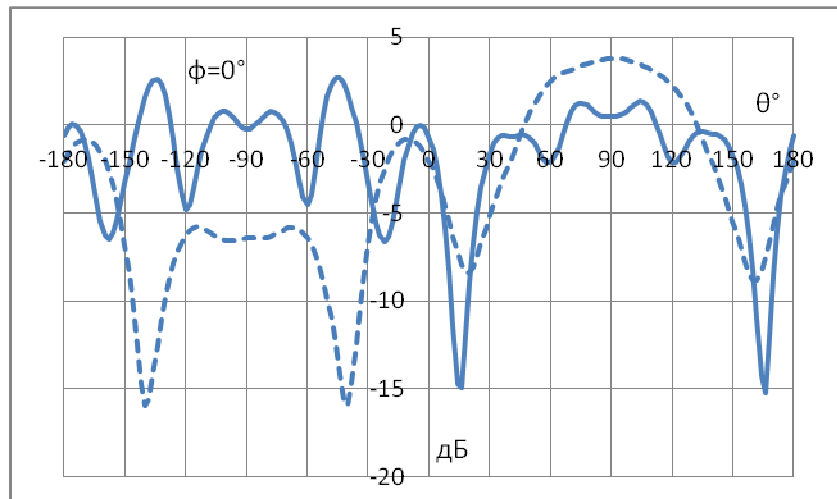
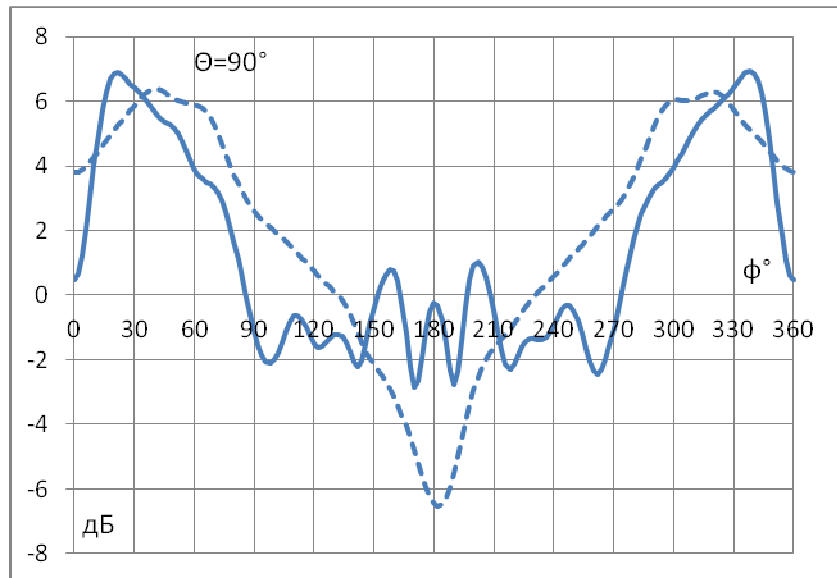
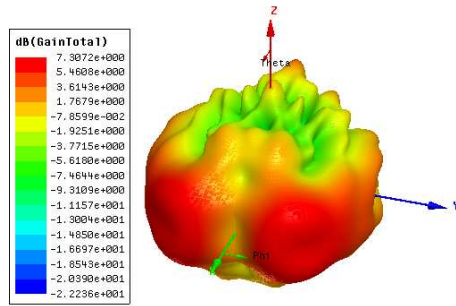
Рис. 8. Частотные зависимости коэффициентов взаимной связи центрального элемента с остальными элементами в решетке.

Характеристики излучения элемента решетки на разных частотах представлены на рис. 9, где приведены диаграммы направленности при возбуждении центрального элемента при согласованных остальных входах в пространстве и в двух сечениях $\Theta=90^\circ$ (плоскость XY) и $\varphi=0^\circ$ (плоскость XZ). Штриховыми линиями в обоих сечениях показаны диаграммы направленности

излучателя в свободном пространстве. Как и в решетке на рис.1, отличие диаграммы элемента в решетке и излучателя обусловлено влиянием на излучение центрального элемента токов, наводимых на соседних элементах, и обратно в силу их электромагнитной связи. Распределения амплитуды электрического поля в двух плоскостях в ближней зоне решётки на соответствующих частотах приведены на рис. 10.



$F = 0.25$ ГГц



$F = 0.7 \text{ ГГц}$

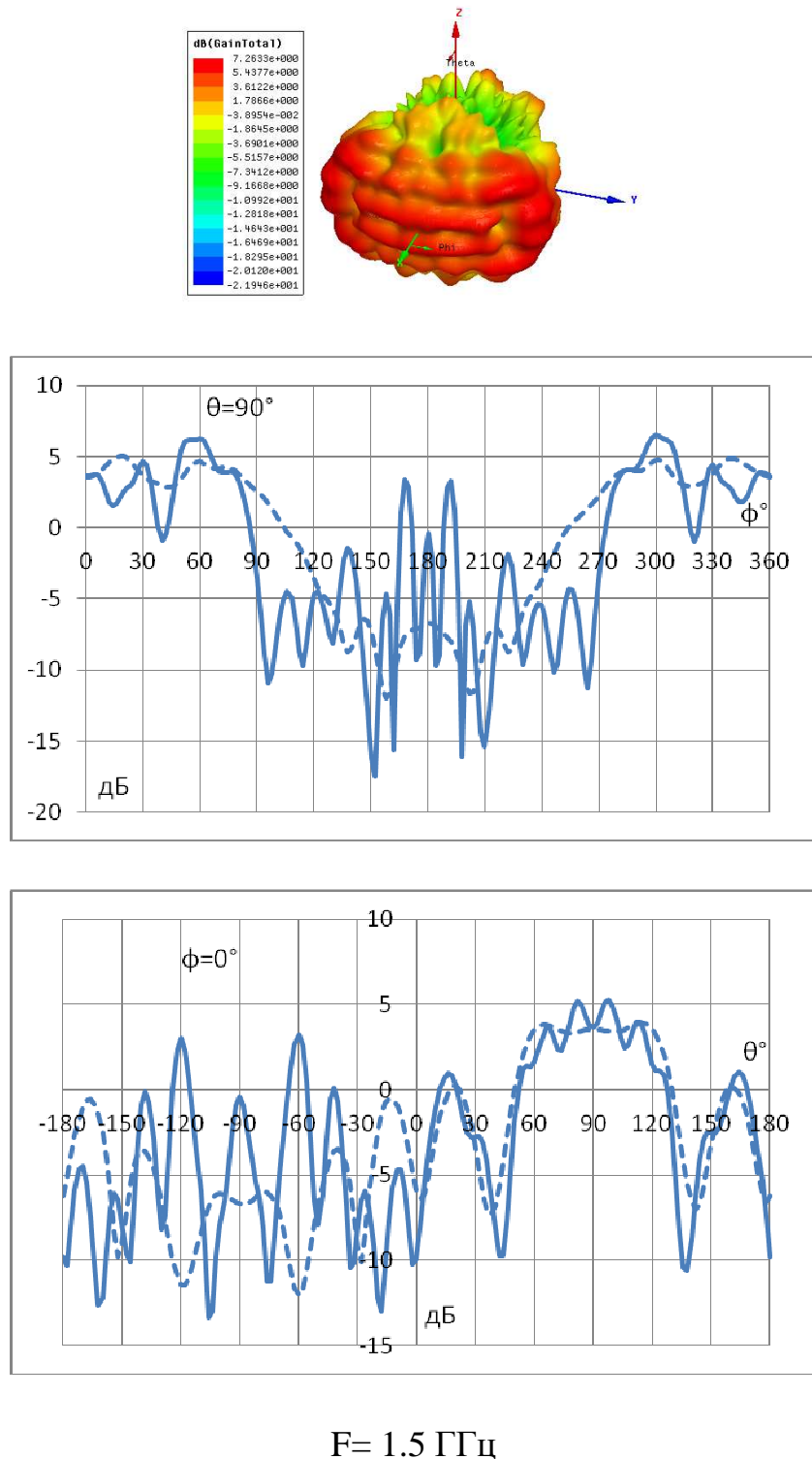


Рис. 9. Диаграммы направленности в пространстве и в двух плоскостях для центрального элемента в решетке при согласованных остальных входах (сплошная линия) и поликонического излучателя (штриховая линия).

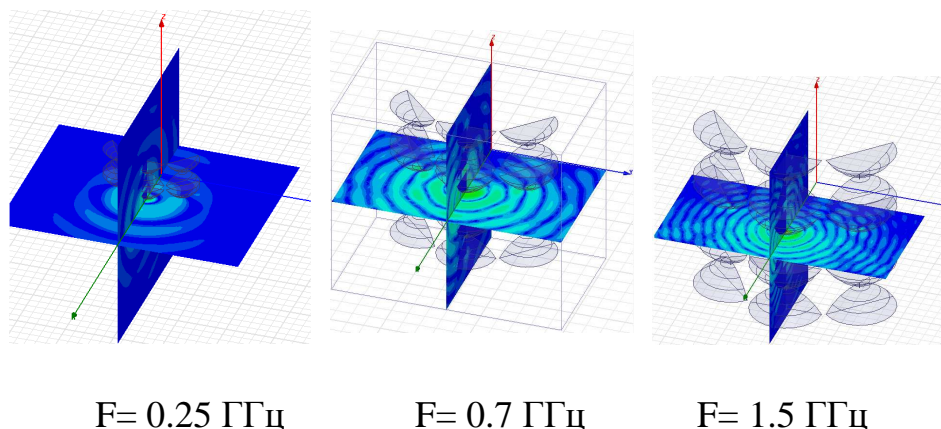


Рис. 10. Распределения амплитуды электрического поля в двух плоскостях в ближней зоне решетки на рис. 6 при возбуждении центрального элемента и согласованных остальных элементах.

2. Антенная решетка из элементов на основе 120-градусной вырезки поликонического излучателя

Рассмотрим возможность уменьшения углового размера элемента антенной решетки за счет использования 120-градусной вырезки из поликонического излучателя, модель которого показана на рис. 11. В отличие от моделей, показанных на рис. 1, 6, в данной модели используется система координат, в которой вертикальной осью является ось Y . Сравнение характеристик согласования в диапазоне частот для двух типов излучателей приведено на рис. 12. Следует отметить, что почти во всем рассмотренном диапазоне частот коэффициент отражения для излучателя меньшего углового размера несколько выше, в то же время оставаясь ниже уровня -10 дБ.

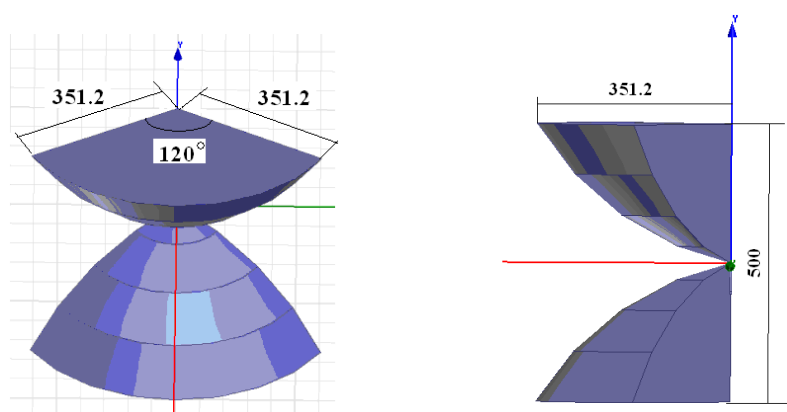


Рис. 11. Элемент на основе 120-градусной вырезки из поликонического излучателя.

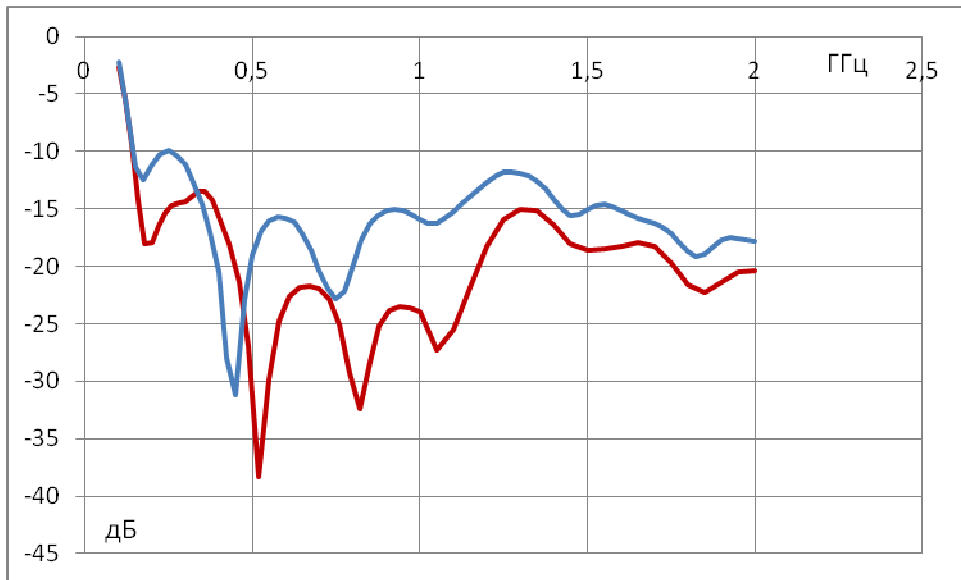


Рис. 12. Согласование излучателей большего размера на рис. 1 (кривая красного цвета) и меньшего размера на рис. 11 (кривая синего цвета) в диапазоне частот.

Рассмотрим такой фрагмент решетки 3x3 из элементов на основе 120-градусной вырезки из поликонического излучателя, геометрия и основные размеры которого приведены на рис. 13.

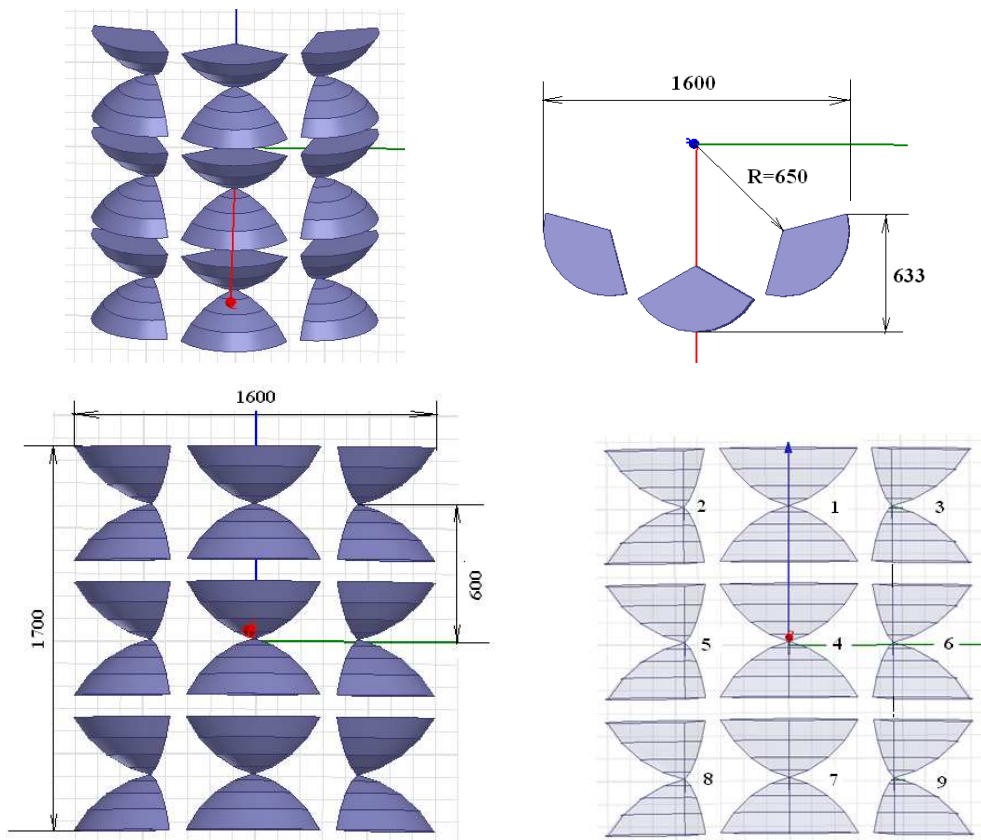


Рис. 13. Модель фрагмента антенной решетки 3x3 из поликонических излучателей на основе 120-градусной вырезки с направлением вектора E в вертикальной плоскости.

Сравнивая их с размерами на рис. 6, видим, что в решетке на рис. 13 достигается существенное уменьшение размера периода решетки в горизонтальной плоскости. На рис. 14 показана частотная зависимость коэффициента отражения центрального элемента решетки с входом 4 при согласованных остальных входах. Там же штриховой линией показана характеристика согласования для поликонического излучателя. Характер кривых такой же, как и для вышерассмотренного выше варианта решетки. Сплошная кривая осциллирует вокруг штриховой, что вызвано взаимной связью между элементами в решетке. Коэффициенты взаимной связи центрального элемента с другими элементами также достаточно быстро убывают с ростом частоты (рис. 15).

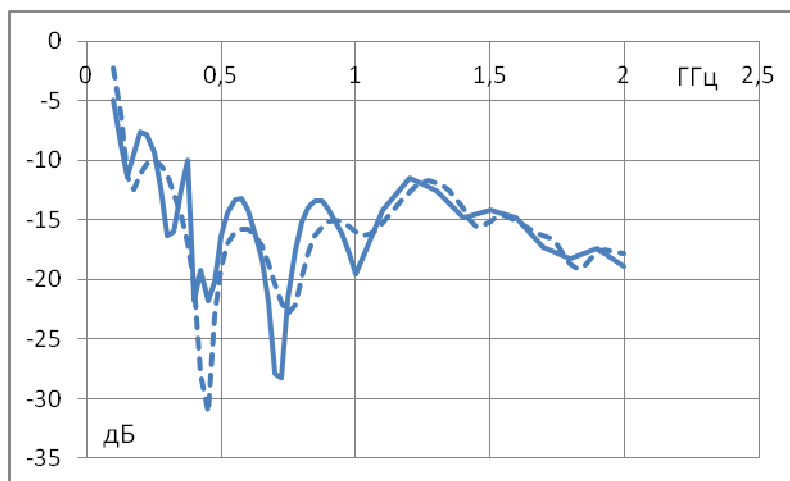


Рис. 14. Характеристика согласования центрального элемента решетки при согласованных остальных элементах (сплошная линия) и поликонического излучателя (штриховая линия).

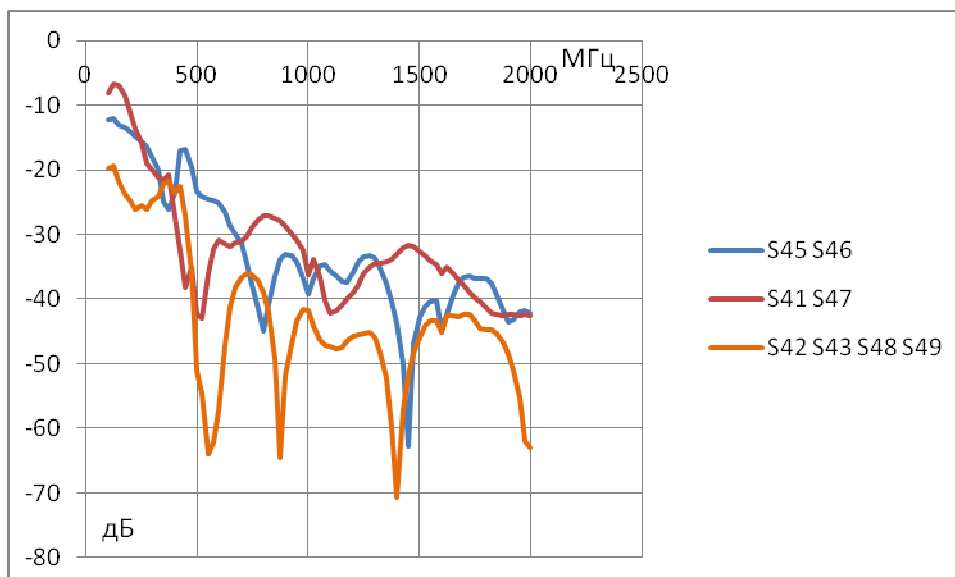
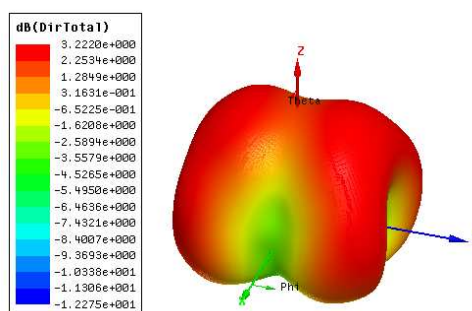
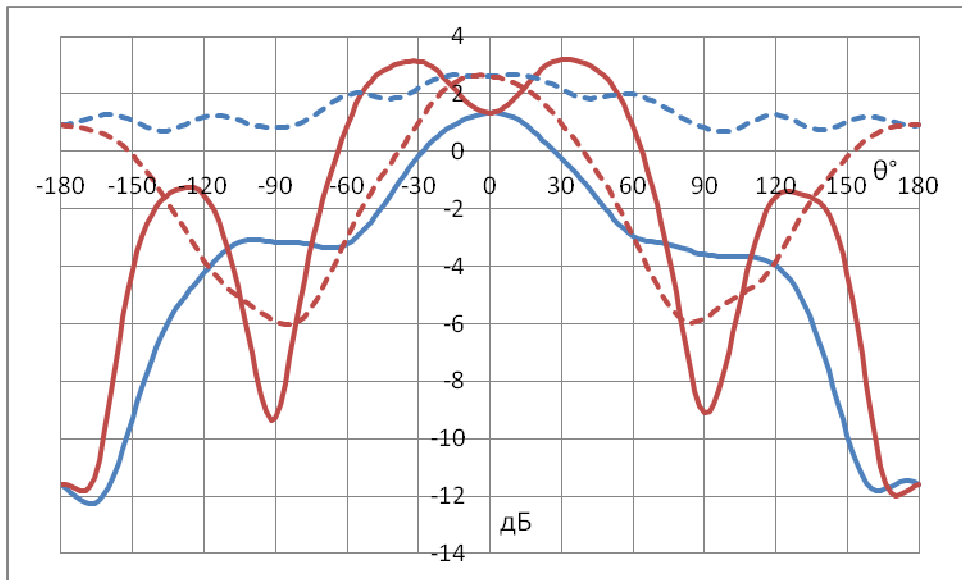


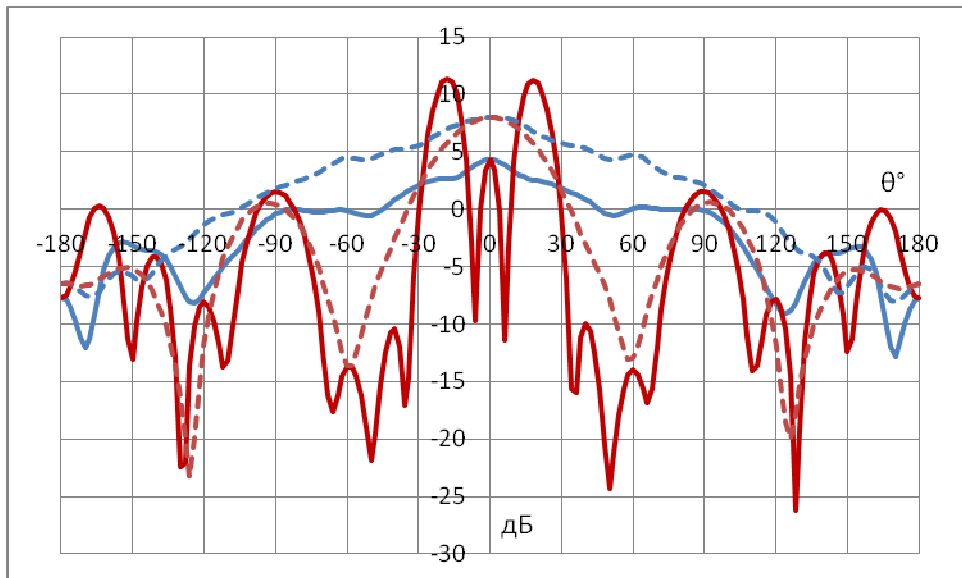
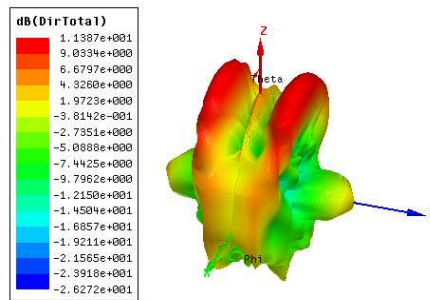
Рис.15. Частотная зависимость коэффициентов взаимной связи центрального элемента с остальными элементами в решетке.

Рассмотрим характеристики излучения. На рис. 16 представлены рассчитанные диаграммы направленности для центрального элемента в решетке на рис. 13 при согласованных остальных входах в пространстве и в двух сечениях $\varphi=90^\circ$ (плоскость ZY) и $\varphi=0^\circ$ (плоскость ZX) на частотах 0.2 ГГц, 0.7 ГГц и 1.5 ГГц. Штриховой линией показаны сечения диаграммы направленности поликонического излучателя. В этом случае также наглядно проявляется достаточно сильное влияние электромагнитной связи между элементами в решетке на диаграмму направленности.

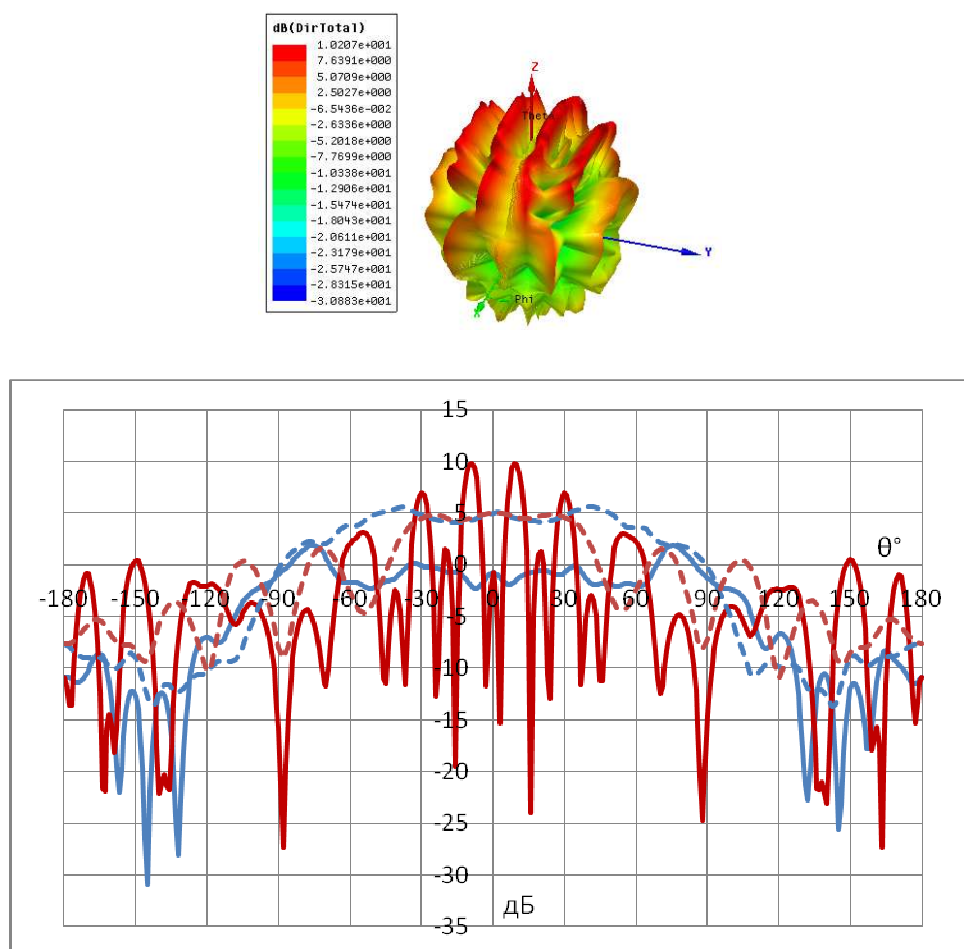




$F = 0.2$ ГГц



$F = 0.7$ ГГц



$$F = 1.5 \text{ ГГц}$$

Рис. 16. Пространственные диаграммы направленности центрального элемента в решетке при согласованных остальных элементах и ее сечения при $\varphi=0^\circ$ (кривые синего цвета) и $\varphi=90^\circ$ (кривые красного цвета).

Таким образом, уменьшение углового размера излучателя не приводит к значительному изменению частотных характеристик коэффициента отражения элемента решетки, при этом осцилляции диаграммы направленности элемента решетки в азимутальной плоскости ($\varphi=0$) уменьшаются.

3. Экспериментальные исследования фрагмента решетки из поликонических излучателей

Для проверки полученных численных результатов были проведены экспериментальные исследования, для чего были изготовлены два фрагмента из трех 180-градусных вырезов из поликонического излучателя с размерами 250

мм x 350 мм x 175 мм, как показано на рис. 17. Для удобства измерений характеристик элемента решетки в условиях ограниченного пространства лаборатории размер образцов был уменьшен в 2 раза в сравнении с размером элемента в разделах 1 и 2. Цель экспериментального исследования - измерение частотной характеристики коэффициента отражения центрального элемента двух типов фрагментов решеток, показанных на рис. 17 а, б. В первом из них элементы расположены соосно в плоскости Е, во втором - в плоскости Н. На том же рисунке представлены фотографии прототипов. В обоих случаях были выполнены измерения частотной характеристики коэффициента отражения центрального элемента при условии, что крайние элементы нагружены на 50-омные нагрузки. Измерения проводились в диапазоне частот 10 МГц - 20 ГГц с помощью скалярного анализатора цепей P2M-40.

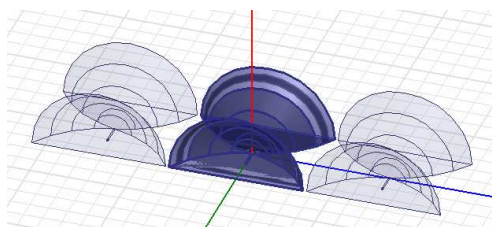
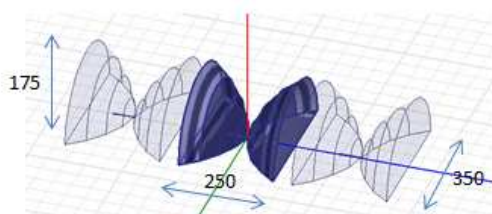
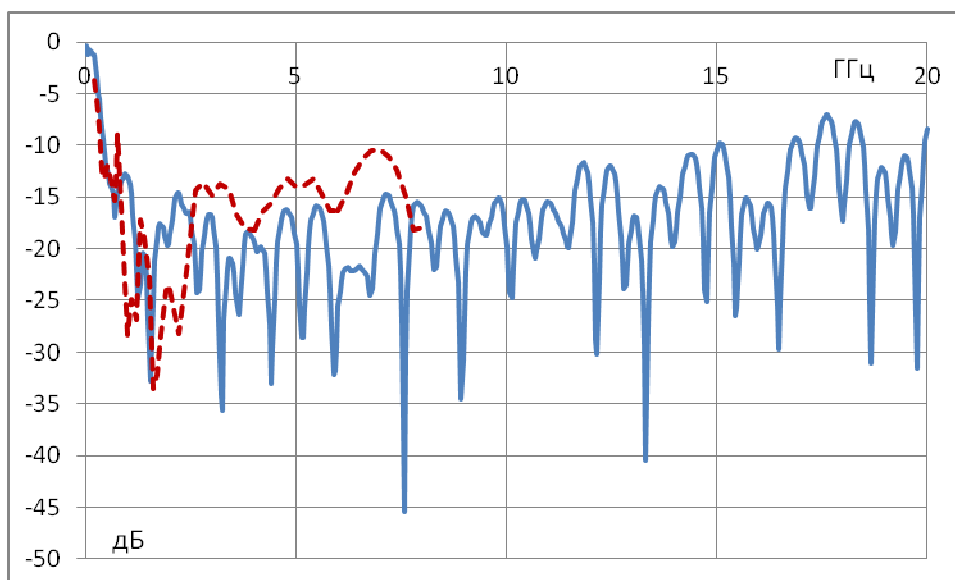
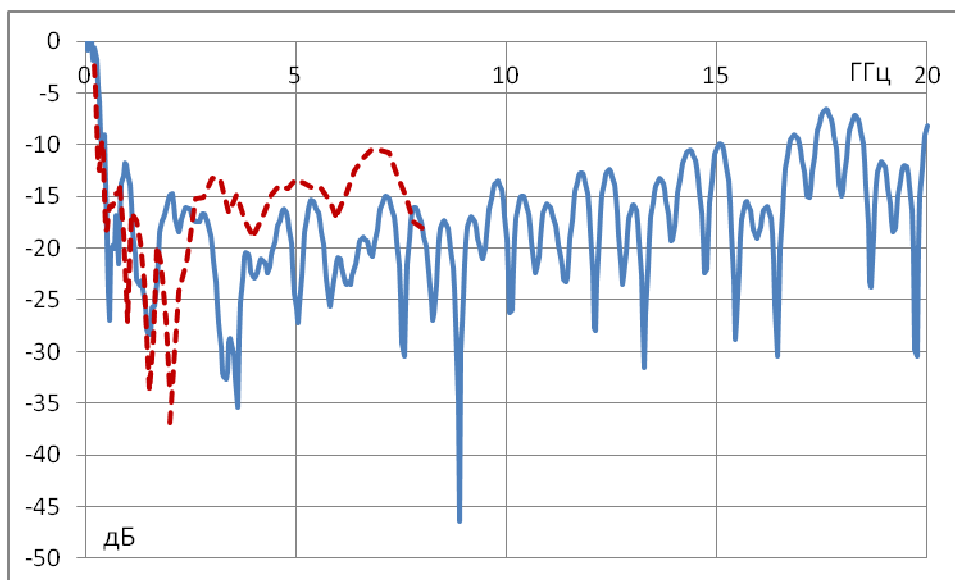


Рис.17. Фрагменты решетки из 3-х поликонических излучателей в плоскости Е
(а) и в плоскости Н (б)

Результаты измерений приведены на рис. 18. Измеренный уровень согласования лучше -10 дБ во всем диапазоне частот от 0.4 ГГц до 15 ГГц. На этих рисунках штриховой линией обозначена рассчитанная характеристика



Решетка в Е плоскости



Решетка в Н плоскости

Рис.18. Измеренные частотные зависимости коэффициента отражения центрального элемента в решетке из трех излучателей при согласовании соседних элементов

коэффициента отражения для соответствующего фрагмента решетки из трех поликонических излучателей. Полученные экспериментальные результаты демонстрируют и подтверждают сверхширокополосные характеристики согласования элементов в исследованных решетках. Наблюдаемое расхождение измеренных и расчетных характеристик обусловлено отличием параметров модели от параметров реальных прототипов.

Заключение

Представленные в данной статье результаты численного моделирования и экспериментального исследования показывают возможность согласования цилиндрических решеток из поликонических излучателей по уровню лучше -10 дБ в полосе частот с отношением верхней частоты к нижней более 1:100. В то же время следует отметить, что на высоких частотах диаграммы направленности элемента решетки в Е плоскости имеют большие осцилляции.

Авторы благодарят сотрудников лаборатории В. Л. Бирюкова и В. В. Заморского за помощь в изготовлении прототипов и проведении измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №12-07-00717-а).

Литература

1. Калошин В. А., Скородумова Е. А. Исследование симметричной поликонической антенны. Труды IV Всерос. н/т конференции Радиолокация и радиосвязь, М., 2010. с.367-371.
2. Калошин В. А., Мартынов Е. С., Скородумова Е. А. Исследование характеристик поликонической антенны в широкой полосе частот // РЭ. 2011.Т.56.№9.С.1094–1098.
3. Калошин В. А., Нгуен К. З. Исследование сверхширокополосной антенной решетки из цилиндрических и поликонических элементов, Доклады II Всерос. Микроволновой конф., ноябрь 2014., М. ИРЭ им. Котельникова РАН, С.514-518.
4. Дупленкова М. Д., Калошин В. А. Излучатель сверхширокополосной кольцевой антенной решетки для сканирования в полупространстве // Труды I

Всеросс. Микроволной конф., 2013, ноябрь, М. ИРЭ им. Котельникова РАН, С.384-388.

5.Бирюков В. Л., Дупленкова М. Д., Калиничев В. И., Калошин В. А. Исследование фрагмента сверхширокополосной кольцевой антенной решетки для сканирования в полусфере // Журнал радиоэлектроники, №1, 2014. <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/21/text.pdf>