

УДК 621.396.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК Е - ПЛОСКОСТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РЕШЕТОК ТЕМ РУПОРОВ

В. А. Калошин<sup>1,2</sup>, К. З. Нгуен<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
125009, Москва, ул. Моховая, 11-7

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (государственный университет),  
141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 10 мая 2017 г.

**Аннотация.** С использованием методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО) проведено численное исследование характеристик согласования и излучения Е- плоскостных линейных решеток трех типов ТЕМ рупоров: классических (регулярных) ТЕМ рупоров, экспоненциально- расширяющихся ТЕМ рупоров и квадратично - нерегулярных ТЕМ рупоров, углы в Е и Н плоскости которых монотонно уменьшаются по направлению к апертуре. Целью данной работы, в первую очередь, является исследование возможности использования эффекта взаимного влияния рупоров для понижения нижней частоты согласования малоэлементных линейных Е - плоскостных решеток из ТЕМ рупоров различных видов. Проведено сопоставление полученных в результате характеристик согласования с аналогичными характеристиками для линейных решеток 90-градусных биконических элементов. Показана возможность реализации синфазного сверхдиапазонного режима работы решетки, т.е. полосы рабочих частот большей, чем 1:10. Второй целью работы является исследование характеристик излучения, в том числе отношения излучения вперед/назад малоэлементных Е - плоскостных линейных решеток из различных типов ТЕМ рупоров.

**Ключевые слова:** СШП антенны, линейные антенные решетки, ТЕМ рупор, нерегулярный ТЕМ рупор.

**Abstract.** Using the finite element method (FEM) and the finite-difference time-domain method (FDTD), a numerical study of the matching and radiation characteristics of E – plane TEM horn linear arrays of three types: classic (regular) TEM horns, exponentially - expanding TEM horns and square - irregular TEM horns, the angles in E and H plane of which are monotonically decreased towards the aperture are conducted. The first goal of this work is to investigate the possibility of using the horns mutual coupling effect to reduce the lower matching frequency of small-number-element E –plane TEM horn linear array of different types. The characteristics of these linear arrays are compared with the ones of 90-degree biconical elements. For in-phase linear arrays the realization possibility of over region band of frequencies (frequency band more than 1:10) is shown. The second purpose of this work is to research the radiation characteristics, including the front-to-back ratio of radiation of small-number-element E-plane TEM horn linear arrays of different types.

**Key words:** UWB antennas, linear antenna arrays, TEM horn, irregular TEM horn

## Введение

Линейные решетки из TEM рупоров широко используются в различных приложениях в качестве сверхширокополосных (СШП) антенн, и также как элементы СШП двумерно - периодических плоских и цилиндрических антенных решеток.

Характеристики излучения и согласования линейных решеток из TEM рупоров, расположенных как в E, так и в H плоскости, исследованы в работах [1- 5]. Взаимодействие с другими элементами решетки, в первую очередь, с соседними рупорами оказывает влияние на характеристики TEM рупора в составе решетки, однако характеристики согласования при этом значительно меняются только для решеток в E плоскости. В работах [4, 5] было показано, что взаимная связь между элементами E - плоскостных линейных решеток TEM рупоров в виде вырезов из биконической линии может приводить к существенному уменьшению коэффициента отражения по сравнению с

одиноким элементом.

Целью данной работы в первую очередь является исследование возможности использования этого эффекта для понижения нижней частоты согласования малоэлементных линейных  $E$  - плоскостных решеток из ТЕМ рупоров различных видов и исследование возможности реализации сверхдиапазонного режима работы решетки, т.е. полосы рабочих частот большей, чем 1:10.

Другой целью работы является исследование характеристик излучения, в том числе уровня заднего излучения малоэлементных  $E$  - плоскостных линейных решеток из различных типов ТЕМ рупоров.

Исследование решеток проводилось с использованием методов конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО).

## 1. Геометрия элементов

Рассмотрим три типа элементов линейной антенной решетки, проекции которых в  $E$  плоскости показаны на рисунках 1а – 3а, а на рисунках 1б - 3б – в  $H$  плоскости. Первый элемент является классическим (регулярным) ТЕМ рупором, который в дальнейшем будем называть просто ТЕМ рупором. Его геометрия характеризуется тремя параметрами: длиной  $L$ , углом  $\alpha$  при вершине равнобедренного треугольника, ограничивающего плоские проводящие поверхности рупора и углом  $\beta$  между этими поверхностями (см. рис. 1), которые определяют нижнюю частоту согласования и входной импеданс рупора. В данной работе исследованы решетки из ТЕМ рупоров с параметрами:  $L = 160$  мм,  $\alpha = 75^\circ$ ,  $\beta = 14^\circ$ . Исследованы также линейные решетки (рис. 2) из хорошо известных экспоненциально - нерегулярных ТЕМ рупоров, углы  $\alpha$  и  $\beta$  которых монотонно увеличиваются по направлению к апертуре. Такие излучатели будем называть нерегулярными рупорами 1-го типа. Исследованы также  $E$  – плоскостные решетки из квадратично - нерегулярных ТЕМ рупоров, углы  $\alpha$  и  $\beta$  которых монотонно уменьшаются по направлению к апертуре (рис.3), и которые будем называть нерегулярными рупорами 2-го типа. Такие ТЕМ рупоры были предложены и исследованы в

работе [6]. Параметры нерегулярного TEM рупора 1-го типа: длина  $L = 160$  мм, начальные углы  $\alpha = 35^\circ$ ,  $\beta = 7^\circ$ , параметры рупора 2-го типа: длина  $L = 320$  мм, начальные углы  $\alpha = 75^\circ$ ,  $\beta = 14^\circ$ . Такой выбор параметров и закона их изменения по длине рупора обеспечивает одинаковый период решетки в  $E$  – плоскости ( $P_x = 40$  мм), одинаковую выходную апертуру элементов  $P_x \times P_z = 250 \times 40$  мм<sup>2</sup> и одинаковый импеданс (50 Ом) в любом сечении рупора. Для сравнения с характеристиками исследуемых линейных решеток в работе приведены характеристики линейной  $E$  – плоскостной решетки из TEM рупоров в виде 90-градусной вырезки из биконической линии (см. рис. 4), которая была с использованием МКЭ была исследована в работах [4, 5]. Параметры 90-градусной вырезки:  $R = 163$  мм, угол образующей конуса  $83^\circ$ , размеры выходной апертуры  $P_x \times P_z = 230 \times 40$  мм<sup>2</sup>. В данной работе характеристики такой решетки рассчитаны также с использованием МКРВО.

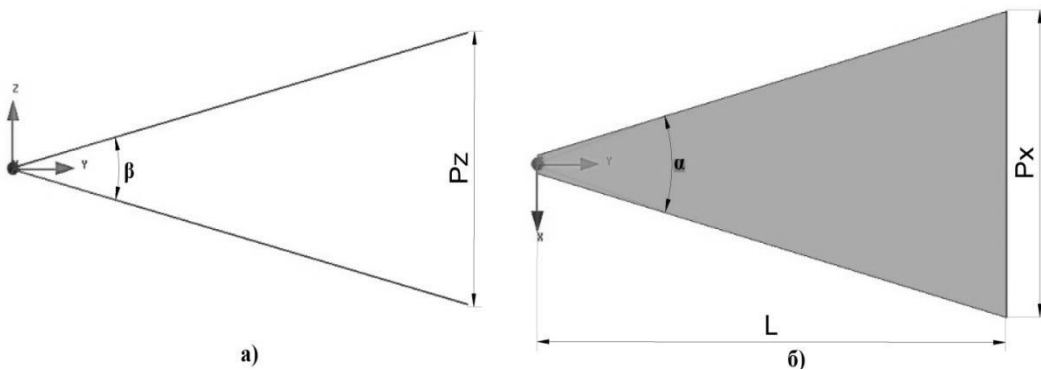


Рис. 1. Регулярный TEM рупор

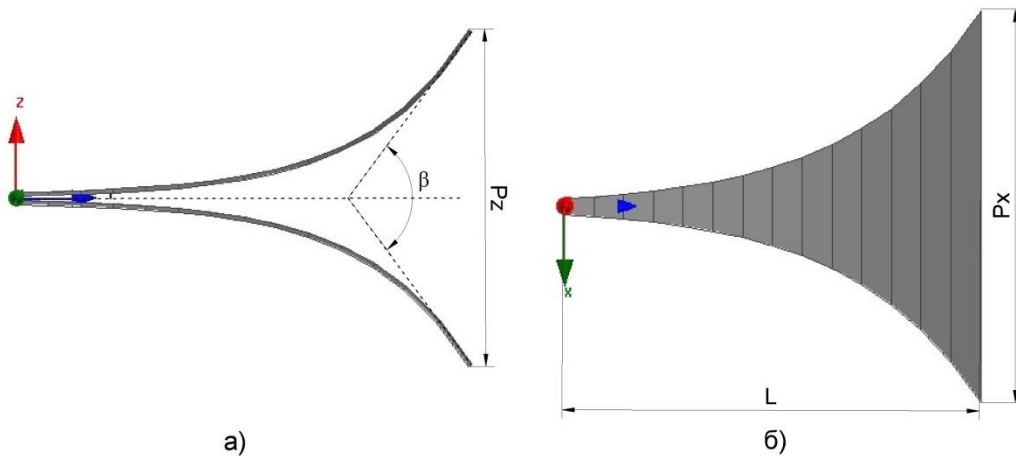


Рис. 2. Нерегулярный TEM рупор 1-го типа с экспоненциальной образующей

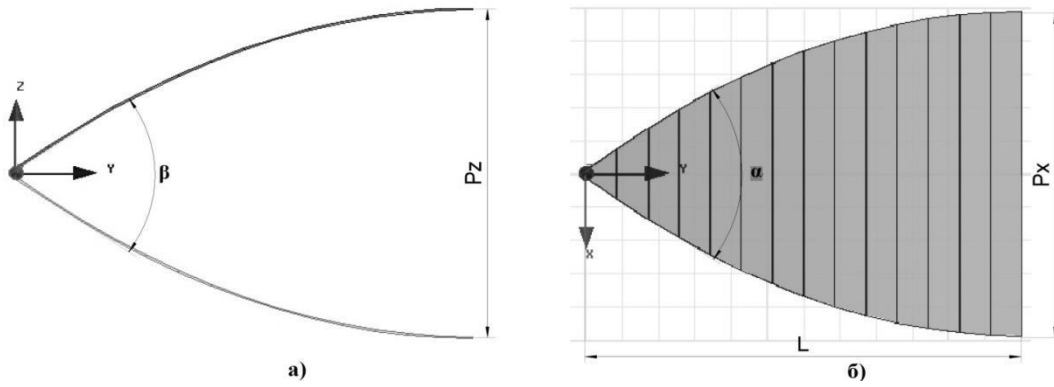


Рис. 3. Нерегулярный ТЕМ рупор 2-го типа с квадратичной образующей

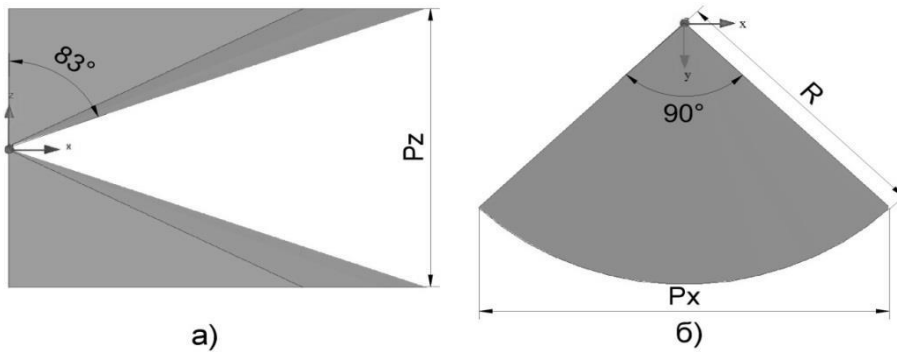


Рис. 4. 90-градусная вырезка из биконической линии

## 2. Исследование согласования синфазных решеток

Исследование согласования решеток проводилось с использованием МКЭ и МКРВО. Элементы решетки возбуждались симметричной полосковой линией с импедансом, равным импедансу ТЕМ рупоров (50 ом). На первом этапе было проведено исследование согласования бесконечных синфазных линейных решеток. Путем введения эквивалентных граничных условий (условий Флоке) задача сводилась к исследованию одного элемента. Зависимость модуля коэффициента отражения бесконечной линейной решетки из ТЕМ рупоров от частоты, рассчитанная с использованием МКЭ, показана на рис. 5 сплошной синей кривой, а штриховой – та же характеристика, рассчитанная методом МКРВО. На том же рисунке сплошной зеленой кривой показана частотная характеристика коэффициента отражения бесконечной линейной решетки из нерегулярных ТЕМ рупоров 1-го типа, рассчитанная методом МКЭ, а штриховой – методом МКРВО. Сплошной красной кривой на рис. 5 показана

зависимость частотной характеристики коэффициента отражения бесконечной линейной решетки из нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа, рассчитанная методом МКЭ, а штриховой – методом МКРВО.

На рис. 5 видно, что хорошее совпадение результатов расчета двумя методами МКЭ и МКРВО наблюдается только для относительно больших величин коэффициента отражения. Однако в данной работе разница в величине модуля коэффициентов отражения, полученная разными методами на уровне ниже – 10 дБ не так важна, так как нас в первую очередь интересует нижняя частота полосы согласования решетки по этому уровню. Как видно на рисунке, бесконечная синфазная линейная решетка из ТЕМ рупоров согласуется по данному уровню, начиная с частоты 0.5 ГГц, бесконечная синфазная линейная решетка из нерегулярных ТЕМ рупоров 1-го типа – с 0.7 ГГц, а бесконечная синфазная линейная решетка из нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа – с 0.45 ГГц. Отметим, что бесконечная линейная решетка из 90-градусных вырезов согласована по такому же уровню начиная с частоты 0.35 ГГц [5].

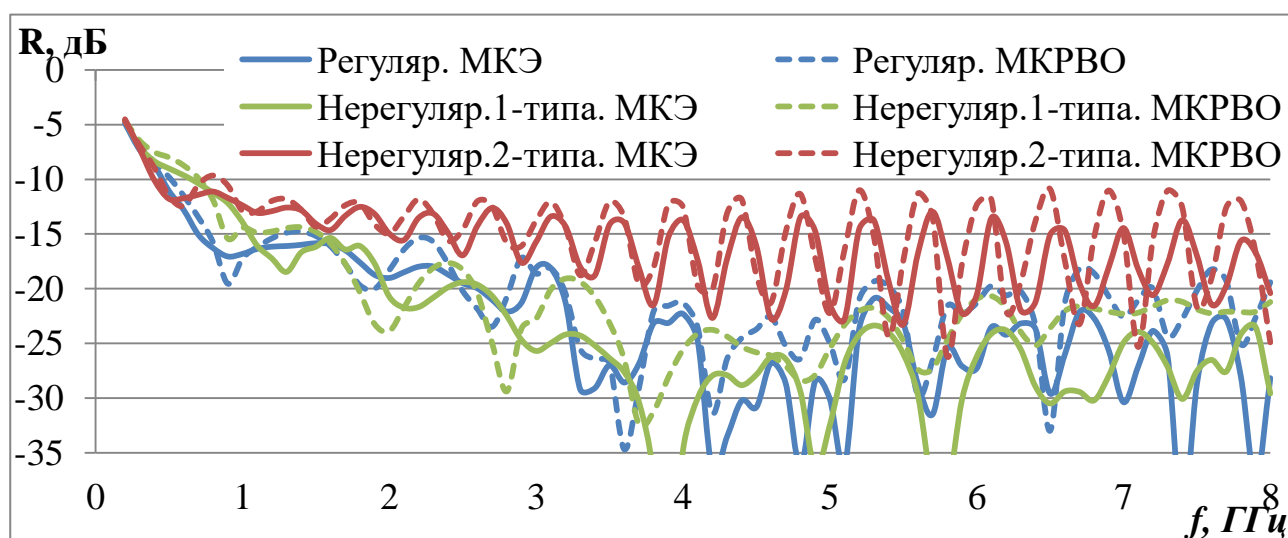


Рис. 5. Зависимость коэффициентов отражения бесконечных линейных решеток из ТЕМ рупоров

Используя МКЭ, был проведен расчет зависимости частотной характеристики коэффициента отражения синфазной решетки из регулярных ТЕМ рупоров и нерегулярных ТЕМ рупоров 2 типа от числа элементов,

результаты которого показаны на рис. 6а и 6б, соответственно. Синей кривой на рисунках показана зависимость от частоты коэффициента отражения одиночного рупора; красной – решетки из 3 рупоров; зеленой – из 6 рупоров; оранжевой – из 9 рупоров, черной – из 12 рупоров, желтой – бесконечной решетки. На рис. 6а видно, что нижняя частота согласования синфазной линейной решетки из 3 х ТЕМ рупоров – 1.1 ГГц, решетки из 6 рупоров – 0.7 ГГц, решетки из 9 рупоров – 0.57 ГГц, а решетка из 12 рупоров – 0.5 ГГц. Нижняя частота согласования одиночного ТЕМ рупора в свободном пространстве - 2.1 ГГц. На рис. 6б видно, что нижняя частота согласования синфазной линейной решетки из 3 х ТЕМ рупоров 2 типа – 1.4 ГГц, решетки из 6 рупоров – 0.6 ГГц, решетки из 9 рупоров – 0.55 ГГц, а решетка из 12 рупоров – 0.5 ГГц. Нижняя частота согласования одиночного ТЕМ рупора в свободном пространстве - 2.4 ГГц.

Таким образом, увеличение числа элементов приводит к монотонному понижению нижней частоты согласования синфазной решетки, причем для 12 элементной линейной синфазной решетки из регулярных ТЕМ рупоров она уже очень близка к нижней частоте согласования бесконечной линейной решетки.

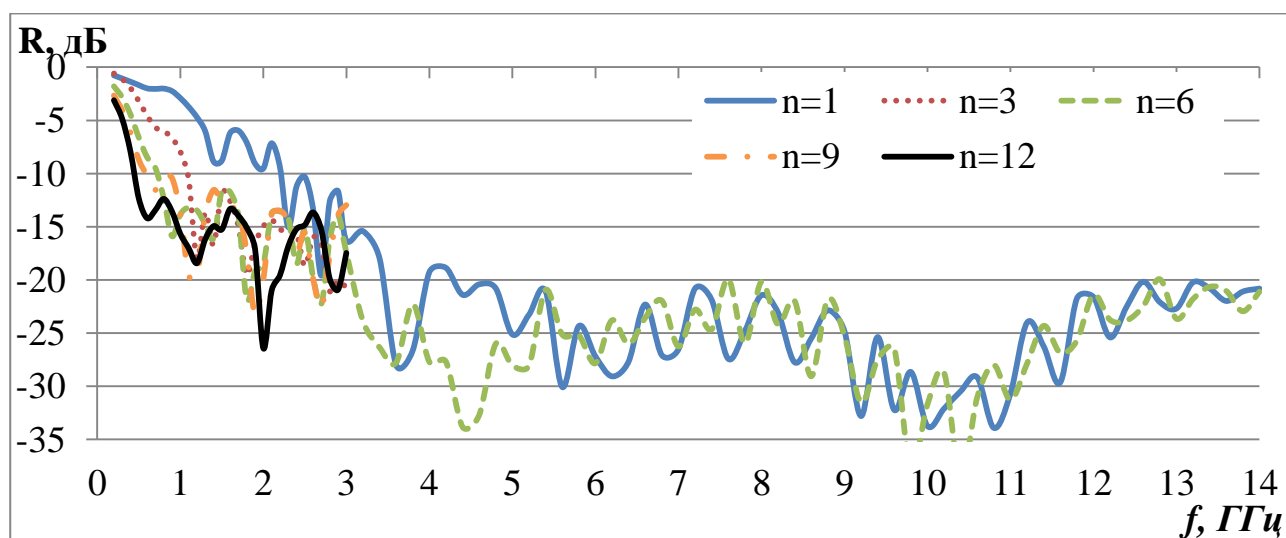


Рис. 6а. Зависимость коэффициентов отражения решеток из  $n$  ТЕМ рупоров от частоты

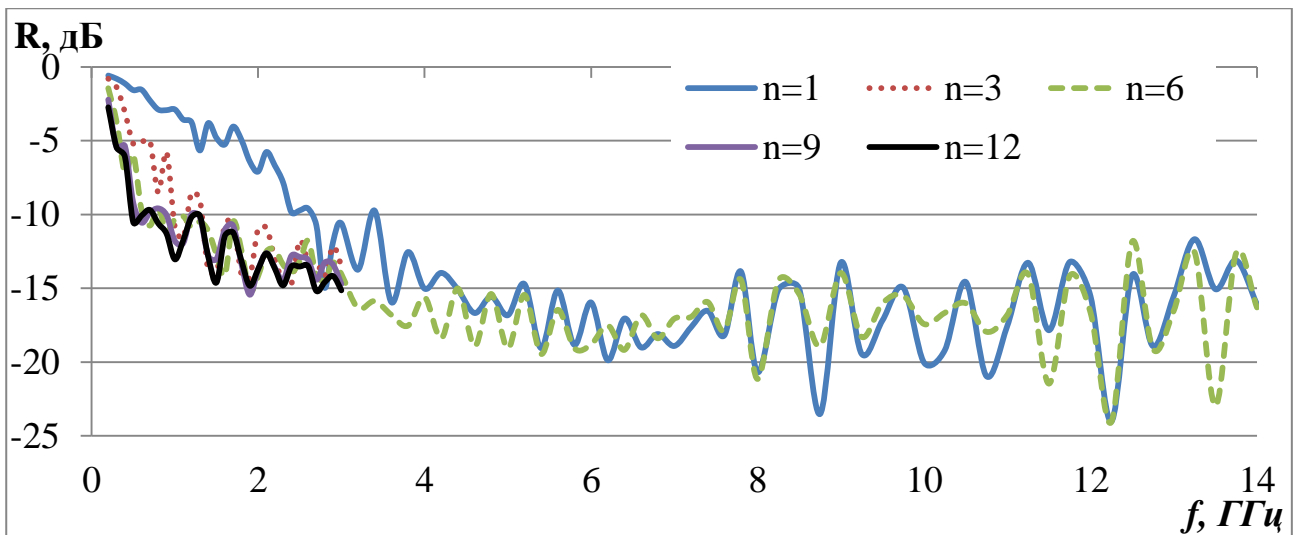


Рис. 6б. Зависимость коэффициентов отражения решеток из  $n$  нерегулярных TEM рупоров 2-го типа от частоты

Отметим, что уровень отражения на высоких частотах слабо зависит от числа элементов и в случае решетки TEM рупоров не превышает -20 дБ, а в случае решетки нерегулярных TEM рупоров 2-го типа не превышает -12 дБ.

### 3. Исследование характеристик излучения синфазных решеток

В данном разделе и далее мы ограничимся исследованием характеристик излучения решеток регулярных TEM рупоров и нерегулярных TEM рупоров 2 типа, принимая во внимание, что нижняя частота согласования решетки нерегулярных TEM рупоров 1 типа в 1.5 раза выше. На рис. 7 приведены диаграммы направленности в E - плоскости 6-элементной синфазной решетки из регулярных TEM рупоров на частотах: 0.8 ГГц – синей кривой, 2 ГГц – зеленой, 7.5 ГГц – оранжевой, 14 ГГц – темно - синей, полученные методом МКЭ, и на тех же на частотах: 0.8 ГГц – красной, 2 ГГц – фиолетовой, 7.5 ГГц – черной, полученные методом МКРВО. На рис. 8 в тех же обозначениях приведены диаграммы направленности 6-элементной синфазной решетки из нерегулярных TEM рупоров 2-го типа в E - плоскости на таких же частотах. На рис. 9, 10 тех же обозначениях приведены диаграммы направленности в H – плоскости 6-элементных описанных выше решеток на частотах 0.8, 2, 7.5 и 14 ГГц. Для сравнения на рис. 11 приведены рассчитанные двумя методами



диаграммы направленности в Н – плоскости 6-элементной синфазной решетки из 90-градусных вырезов биконической линии.

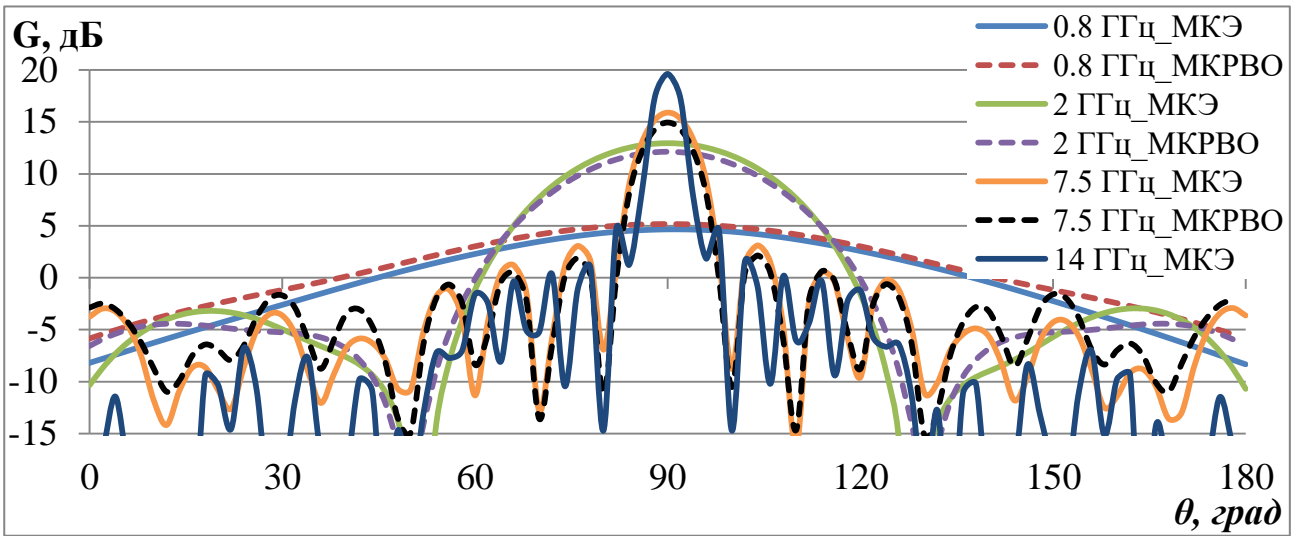


Рис.7. Диаграммы направленности решетки 6 ТЕМ рупоров в Е – плоскости

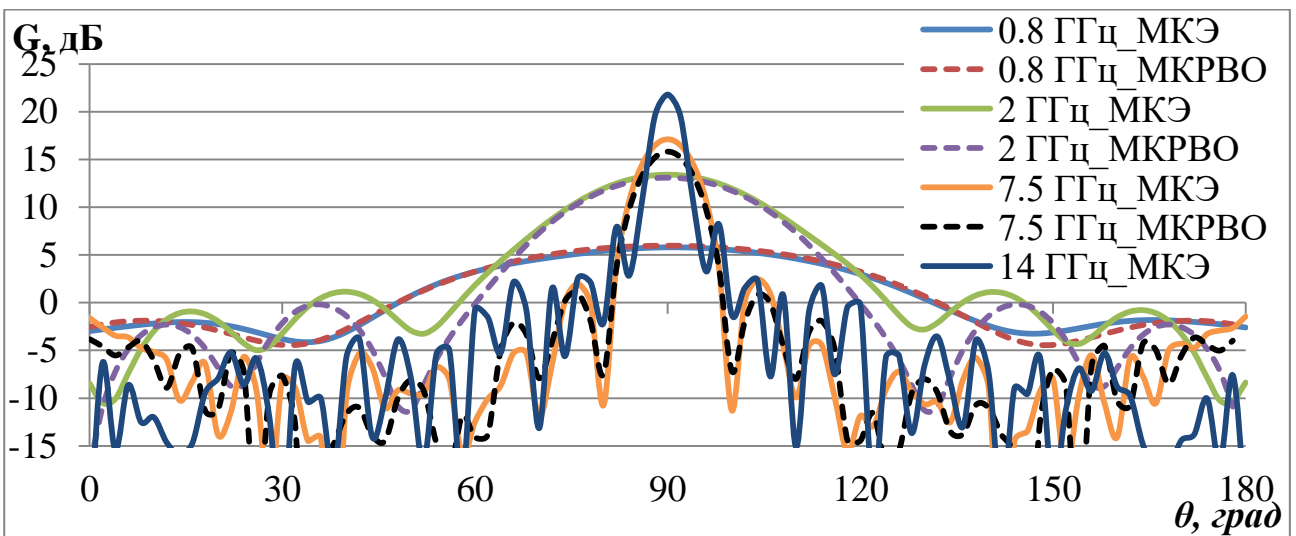


Рис. 8. Диаграммы направленности решетки 6 нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа в Е – плоскости

На рисунках 7 – 11 видно, что методы МКЭ и МКРВО обеспечивают хорошее совпадение результатов расчетов диаграмм направленности антенных решеток. На рисунках также можно увидеть, что с увеличением частоты ширина главного лепестка в Е плоскости монотонно уменьшается, а

относительный уровень бокового излучения – падает. При этом решетки из регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров имеют на высоких частотах более изрезанные диаграммы направленности в Н – плоскости, а также более высокий уровень заднего излучения по сравнению с решеткой из биконических вырезов.

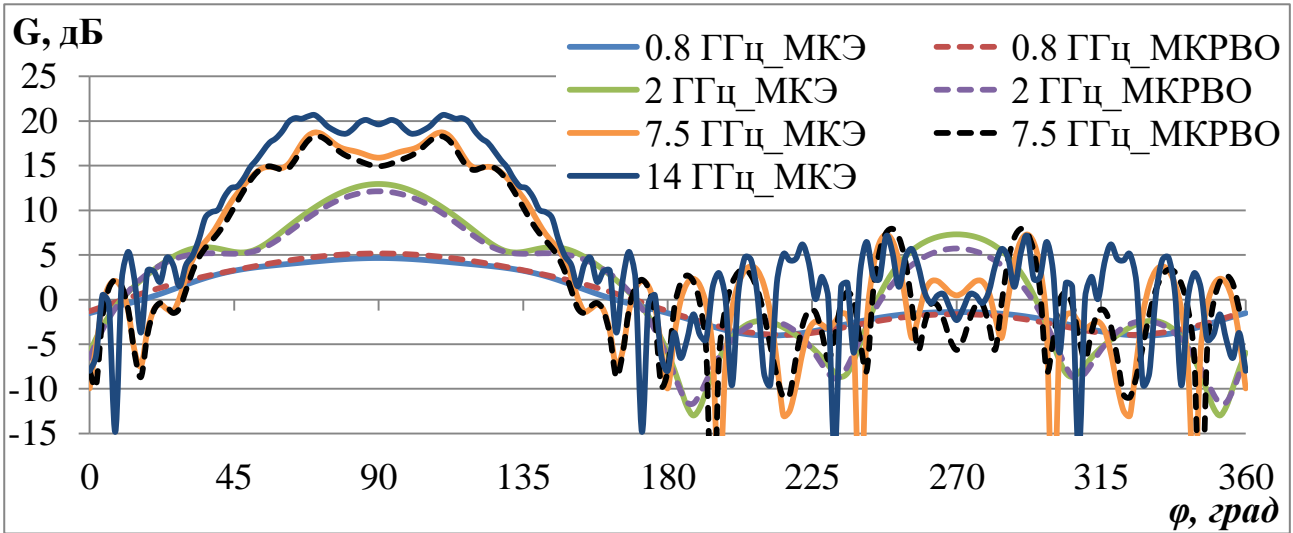


Рис. 9. Диаграммы направленности синфазной решетки 6 ТЕМ рупоров в Н – плоскости

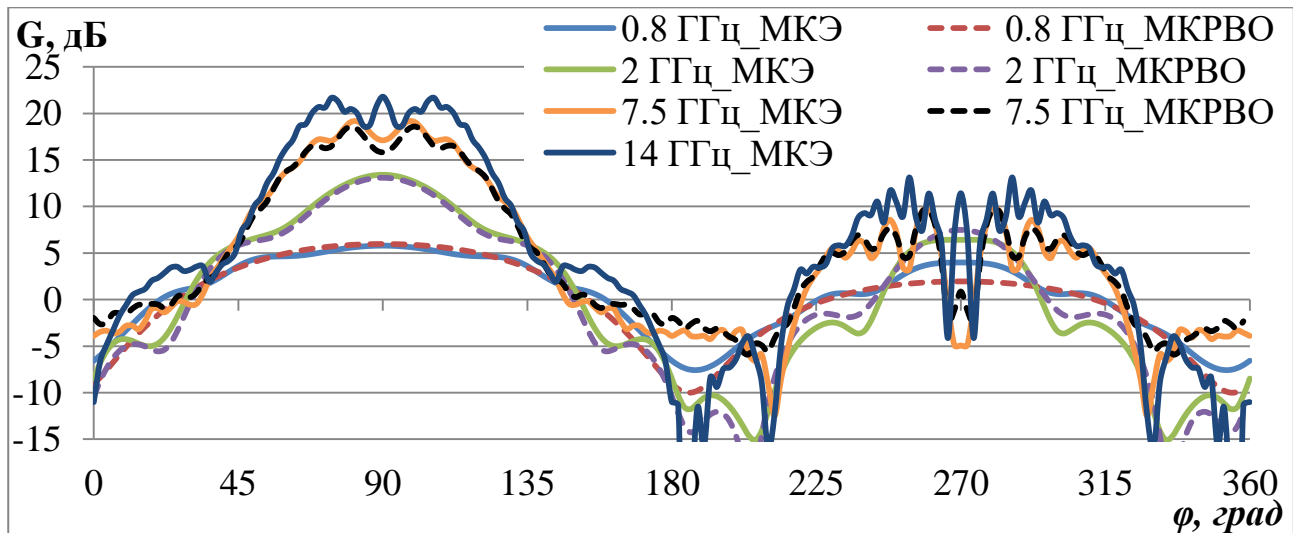


Рис.10 . Диаграммы направленности решетки из 6 нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа в Н – плоскости

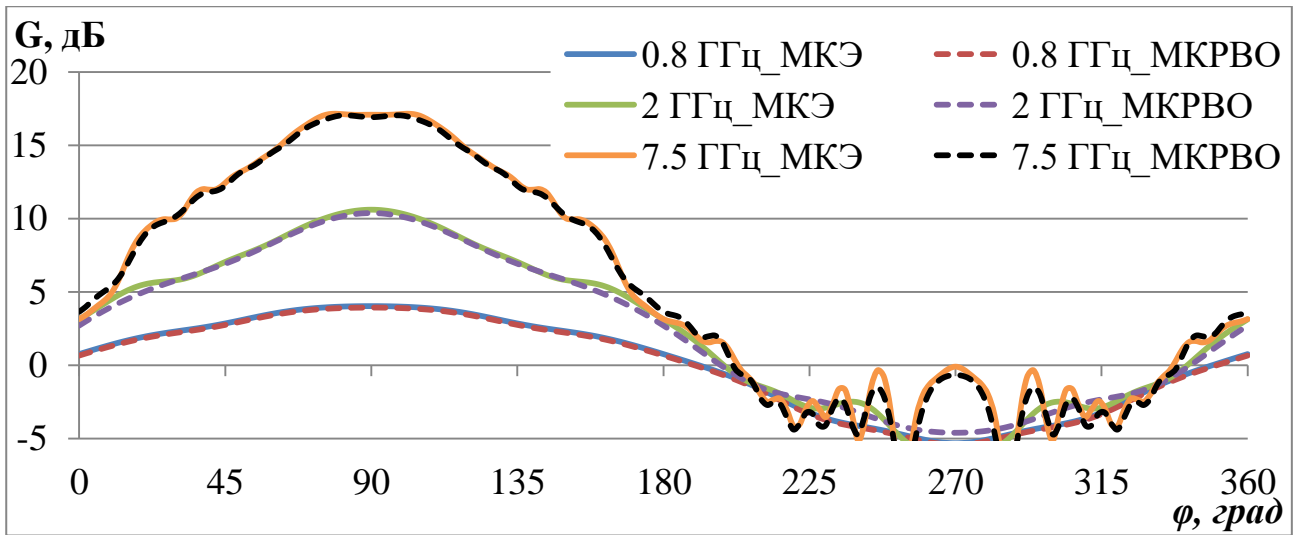


Рис. 11. Диаграммы направленности решетки 6 90-градусных вырезов в Н – плоскости

Зависимости коэффициентов усиления 6-элементных линейных синфазных решеток от частоты, рассчитанные методом МКЭ, проведенные на рис. 12 синей линией для решетки регулярных ТЕМ рупоров, красной - решетки нерегулярных ТЕМ рупоров 2-го типа, черной - решетки 90-градусных вырезов [5]. На рис. 13 в таких же обозначениях приведены зависимости отношения излучающих мощностей вперед / назад (Front-to-back ratio) таких решеток.

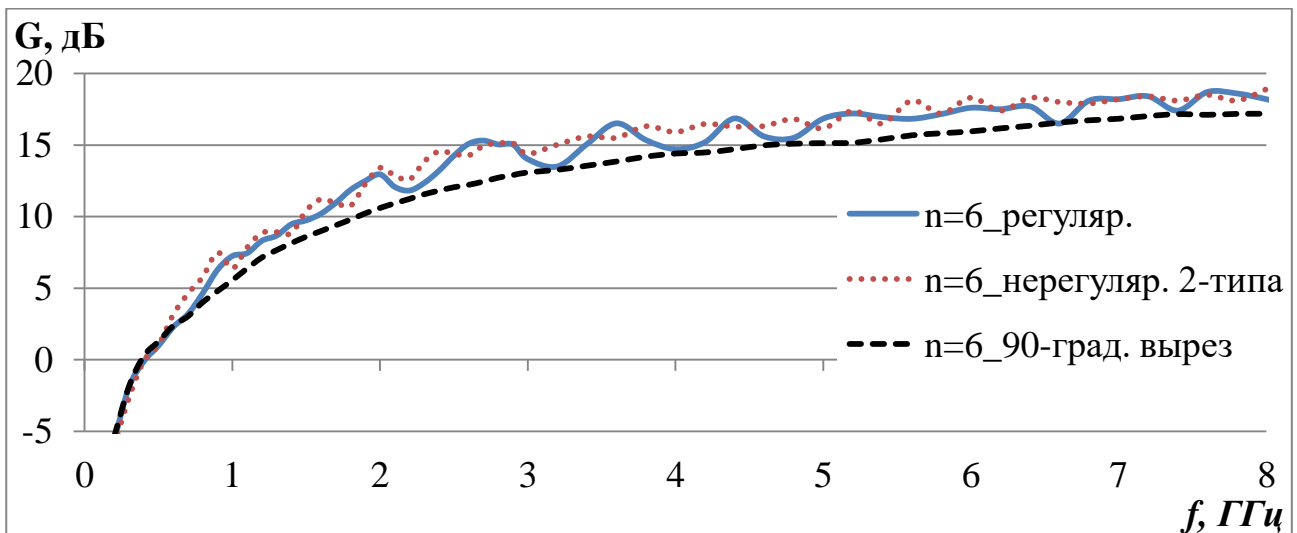


Рис. 12. Зависимость коэффициентов усиления линейных синфазных решеток от частоты

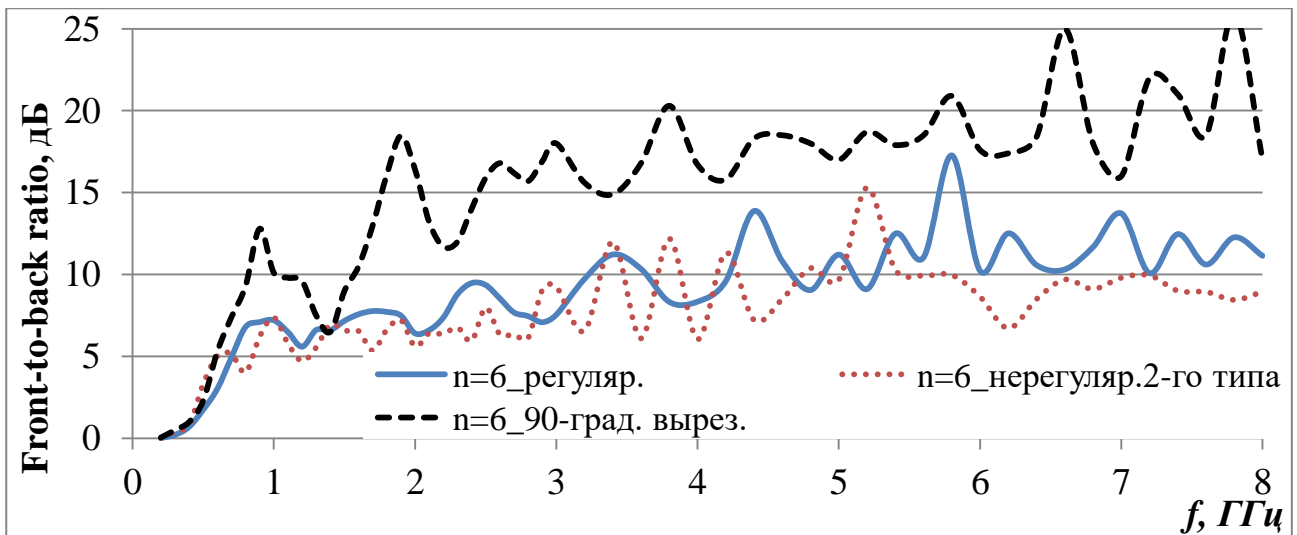


Рис. 13. Зависимость отношения мощностей излучения вперед / назад от частоты

На рис. 12 видно, что коэффициент усиления решетки из 90-градусных вырезок монотонно растет с частотой, а у решеток из регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров растет почти монотонно, обеспечивая в результате несколько большее усиление. Последнее можно объяснить тем, что размер апертуры у ТЕМ рупоров немного больше, чем у 90-градусной вырезки (см. выше). При этом отношение излученных мощностей вперед / назад у решеток из регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров сначала растет с частотой, а затем стабилизируется на уровне около - 10 дБ, а у решетки из 90-градусных вырезок стабилизируется на уровне примерно - 20 дБ. Увеличенный уровень заднего излучения линейной решетки из ТЕМ рупоров можно объяснить возбуждением обратной волны между элементами, что уже обсуждалось в [7].

#### 4. Исследование характеристик сканирующих решеток ТЕМ рупоров

Поскольку характеристики согласования и излучения синфазных решеток регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров 2 типа близки, в данном разделе ограничимся исследованием решеток регулярных ТЕМ рупоров. Вначале проведем исследование зависимости коэффициента отражения бесконечной решетки в полосе частот при разных углах сканирования, используя здесь и далее МКЭ. Синей кривой на рис. 14 показана зависимость коэффициента отражения бесконечной синфазной решетки от частоты; красной — при угле

отклонения луча от оси решетки на  $\pm 15^\circ$ ; зеленой – при угле отклонения -  $\pm 30^\circ$ ; черной – при угле отклонения -  $\pm 45^\circ$ .

На рис. 14 видно, что при отклонении луча на  $15^\circ$  нижняя граница согласования бесконечной решетки (0.5 ГГц) практически не меняется. При угле отклонения луча на  $30^\circ$  и  $45^\circ$  нижняя граница согласования решетки сдвигается вверх по частоте до 0.6 ГГц и 0.8 ГГц, соответственно. Интересно отметить, что в отличие от решетки из биконических вырезов [4,5] верхняя граница полосы частот согласования решеток из регулярных и нерегулярных ТЕМ рупоров в исследованной полосе частот отсутствует.

Далее было проведено исследование характеристик согласования линейной решетки из 6 ТЕМ рупоров. На рис. 15 в тех же обозначениях показаны зависимости коэффициента отражения синфазной линейной решетки из 6 ТЕМ рупоров от частоты, и также при угле отклонения луча на  $\pm 15^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ . На рис. 15 можно видеть, что, аналогично случаю бесконечной линейной решетке, при отклонении луча на  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $45^\circ$  нижняя граница согласования решетки из 6 элементов регулярных ТЕМ рупоров сдвигается вверх по частоте (на 0.8 ГГц, 0.9 ГГц и 1 ГГц, соответственно) и отсутствует верхняя граница полосы частот согласования.

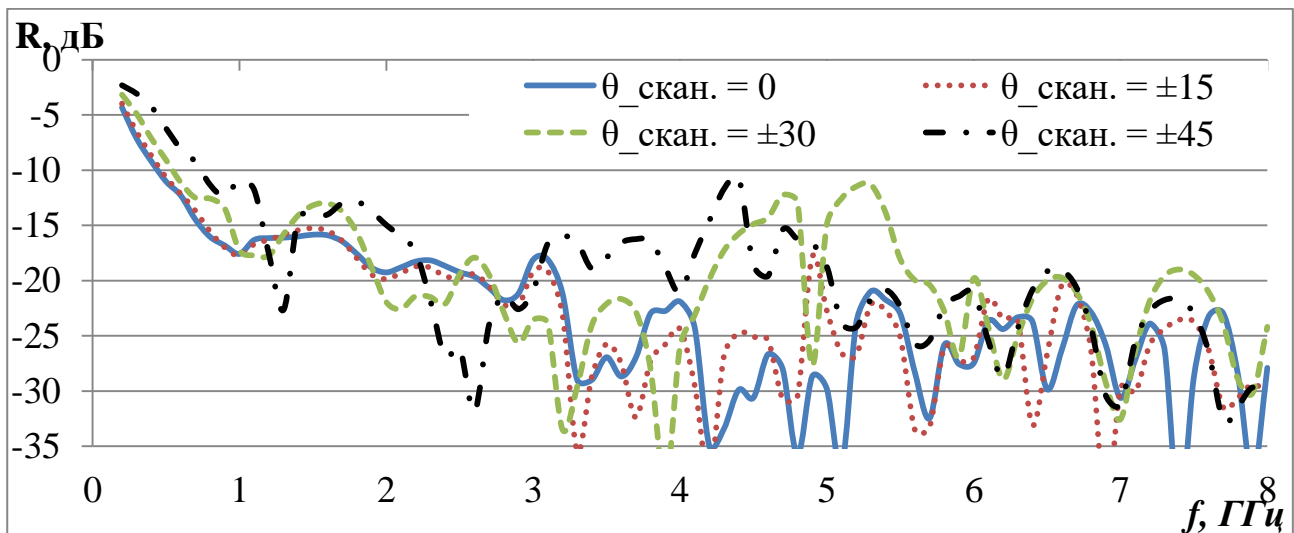


Рис. 14. Зависимости коэффициента отражения сканирующей бесконечной решетки ТЕМ рупоров от частоты

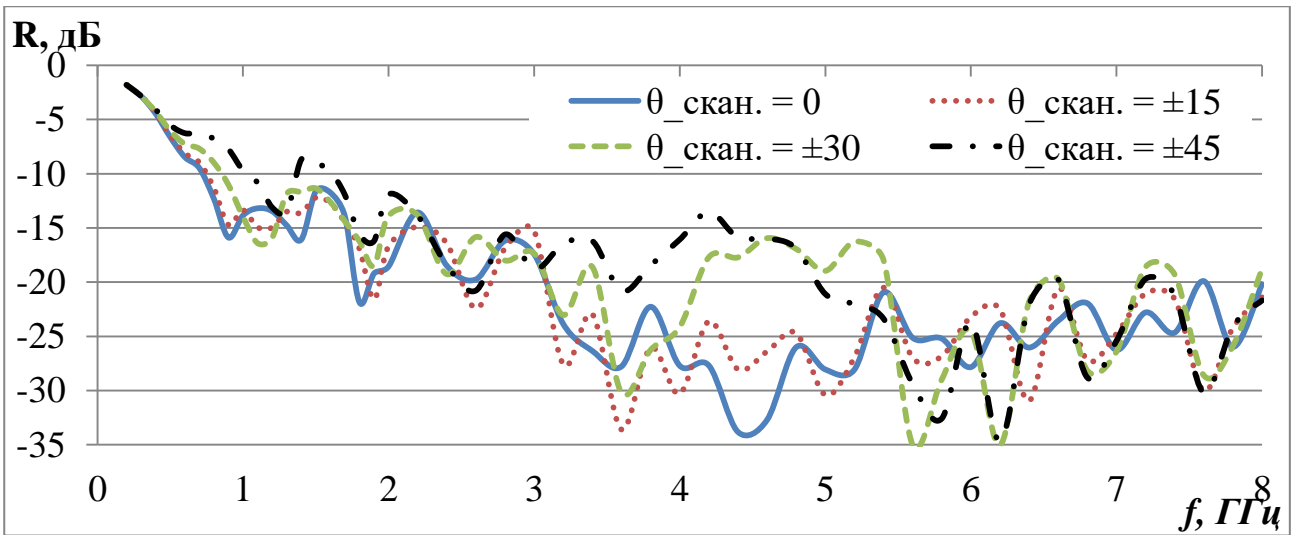


Рис. 15. Зависимости коэффициента отражения 6-элементной сканирующей решетки TEM рупоров от частоты

Диаграммы направленности в E плоскости 6-элементной сканирующей решетки из TEM рупоров на частоте 3.8 ГГц ( $Pz/\lambda = 0.5$ ), приведены на рис. 16. Синей кривой на рисунке показана диаграмма направленности в режиме синфазной работы 6-элементной решетки, красной – при отклонении луча на  $\pm 15^\circ$ , зеленой - при отклонении луча на  $\pm 30^\circ$ , черной - при отклонении луча на  $\pm 45^\circ$ .

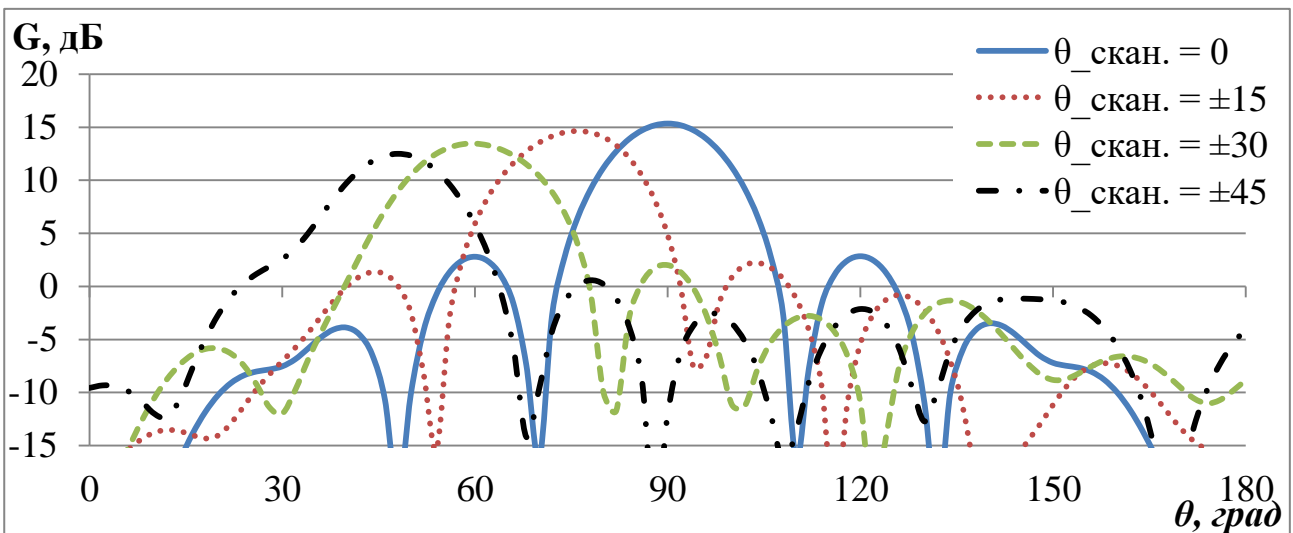


Рис. 16. Диаграммы направленности 6-элементной сканирующей решетки из TEM рупоров на частоте 3.8 ГГц при  $\varphi = 90^\circ$

На рисунке 16 видно, что при отклонении луча от нормали усиление решетки падает незначительно и относительный уровень боковых лепестков остается достаточно низким (11 – 12 дБ).

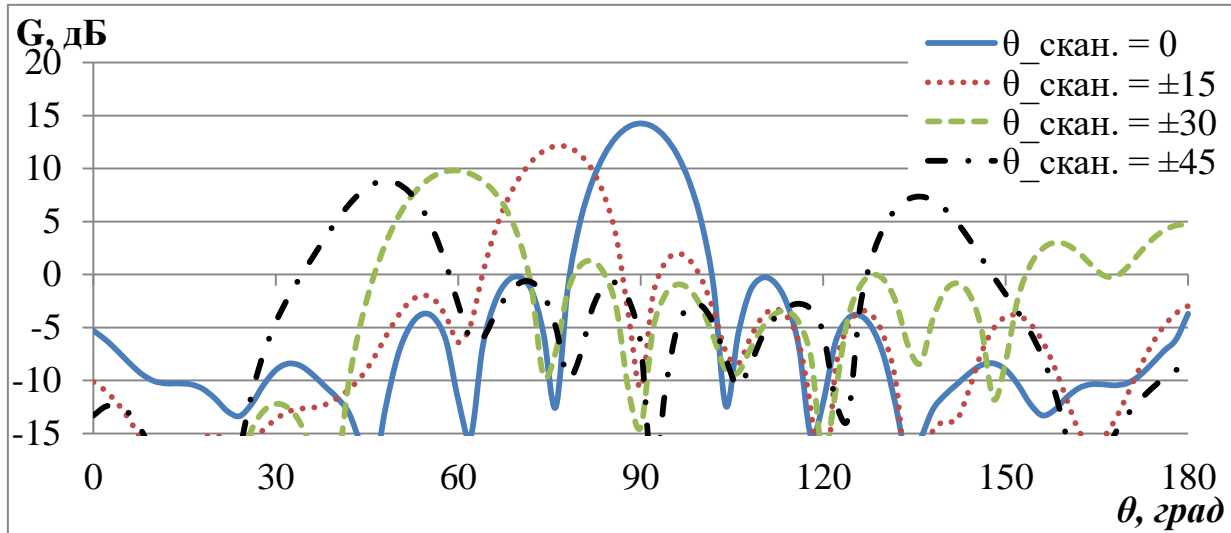


Рис. 17. Диаграммы направленности 6-элементной сканирующей решетки из ТЕМ рупоров на частоте 5 ГГц при  $\varphi = 90^0$

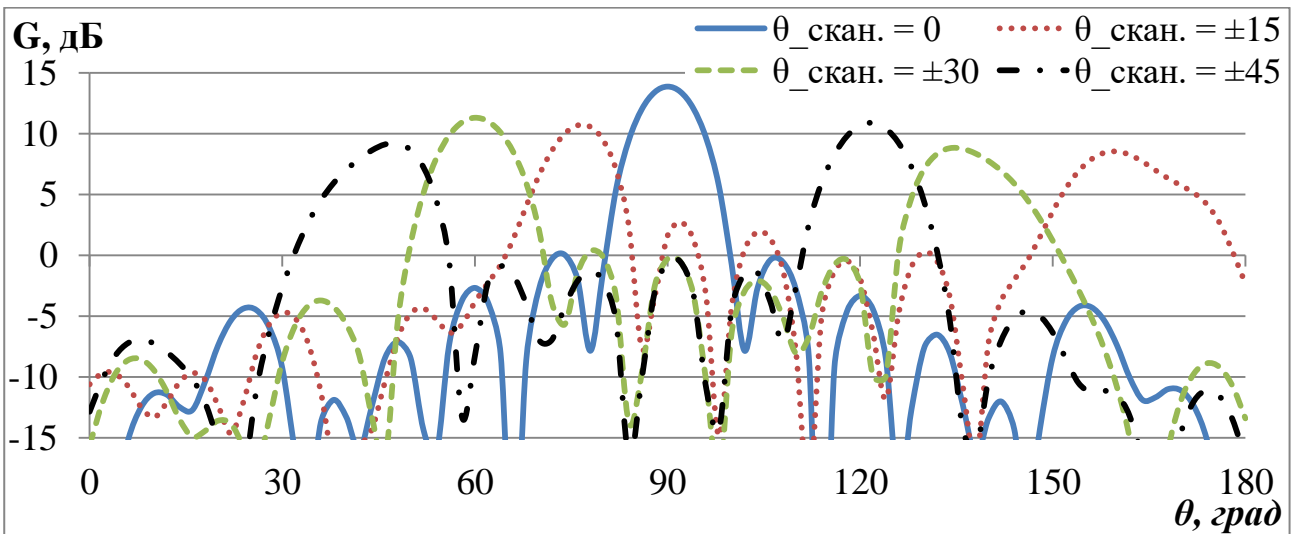


Рис. 18. Диаграммы направленности 6-элементной сканирующей решетки из ТЕМ рупоров на частоте 6 ГГц при  $\varphi = 90^0$

На рис. 17, 18 в тех же обозначениях приведены диаграммы направленности в Е плоскости 6-элементной сканирующей решетки из ТЕМ рупоров на частоте 5 ГГц и 6 ГГц, соответственно. На рис. 17 видно, что у

решетки из 6 ТЕМ рупоров на частоте 5 ГГц при отклонении луча уже на 30 градусов резко растет боковое излучения, а на 6 ГГц уровень бокового излучения сопоставим с уровнем главного лепестка (рис.18).

## **Заключение**

На основании проведенных в работе исследований можно сделать следующие выводы:

- Увеличение числа элементов линейной синфазной решетки регулярных ТЕМ рупоров и нерегулярных ТЕМ рупоров 2 типа приводит к монотонному понижению нижней частоты согласования, нижний предел которой определяется нижней частотой согласования бесконечной решетки, при этом рабочая полоса согласования решетки из ТЕМ рупоров, начиная с 6-элементных решеток, превышает величину 1:20

- С увеличением частоты коэффициент усиления синфазных решеток почти монотонно растет, а отношение излученных мощностей вперед / назад падает до уровня ниже -10 дБ.

- В режиме сканирования решетки регулярных ТЕМ рупоров рабочая полоса частот уменьшается со стороны нижних частот за счет повышения нижней частоты согласования, а со стороны верхних частот – за счет резкого роста уровня бокового лепестка и, в результате, полоса 6 элементной решетки сужается до 1:5.

Таким образом, в работе показана возможность реализации сверхдиапазонного режима работы синфазной линейной решетки ТЕМ рупоров. Ответ на вопрос о возможности реализации такого режима для сканирующих решеток из ТЕМ рупоров требует дальнейших исследований.

Отметим, что синфазные решетки могут быть использованы в качестве кластерных облучателей сверхширокополосных многолучевых систем.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-07-07797.



## Литература

1. Wang J., Tian C., Luo G., Chen Y., Ge D. Four-element TEM horn array for radiating ultrawideband electromagnetic pulses // *Microw. Opt. Technology Lett.* 2001. Vol. 31. No. 3. pp. 190 - 194
2. Wu F., Yuan N. The radiation characteristic of UWB planar TEM horn antenna array // *CIE International Conference Radar. China, 16-19 Oct. 2006*
3. Keskin A.K., Senturk M.D., Turk A.S. Quasi TEM horn antenna array for rescue radar buried victims under rubble // *8th International Workshop Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Italy, 7-10 July 2015*
4. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхдиапазонные рупорные излучатели и антенные решетки // *26-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, Россия, 4 -10 сентября 2016. С. 84 – 95*
5. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхдиапазонные излучатели и антенные решетки на основе биконических рупоров // *Антенны. 2016. №8. С. 69 – 76*
6. Калошин В.А., Нгуен К.З., Нгуен Н.Ш. Исследование характеристик TEM рупоров. // *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/2/text.pdf>*
7. Банков С.Е., Калошин В.А., Нгуен К.З. К теории антенных решеток из TEM рупоров // *Труды IV Всероссийской Микроволновой конференции, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, 26 – 28 ноября 2016. С. 410 – 413*

### **Ссылка на статью:**

В. А. Калошин, К. З. Нгуен. Исследование характеристик E - плоскостных линейных решеток TEM рупоров. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/12/text.pdf>*