

DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.2

УДК 621.396.67

## СВЕРХДИАПАЗОННАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ТЕМ РУПОРОВ

В. А. Калошин<sup>1</sup>, Н. Т. Ле<sup>2</sup>, Е. В. Фролова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125007, г. Москва, ул. Моховая д. 11, стр.7

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Статья поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

**Аннотация.** С использованием электродинамического моделирования на основе методов конечных элементов исследовано полотно сверхдиапазонной цилиндрической антенной решетки ТЕМ рупоров с металлизацией межрупорного пространства и экраном. Антенная решетка состоит из 40 линейных решеток, расположенных по окружности. Найдена диаграмма направленности линейной решетки в составе цилиндрической и проведены исследования зависимости характеристик согласования и излучения цилиндрической решетки в зависимости от числа возбужденных линейных решеток, а также числа ТЕМ рупоров в линейной решетке. Показано, что цилиндрическая решетка с 19 возбужденными линейками по 16 ТЕМ рупоров согласована в полосе частот более 40:1.

**Ключевые слова:** цилиндрическая антенная решетка, сверхширокополосная антенна, сверхдиапазонная антенна.

**Abstract.** Using electrodynamic modeling on the basis of finite element methods, an over-range cylindrical antenna array of TEM horns with metallization of the inter-horn space and a screen is studied. The antenna array consists of 40 linear arrays arranged in a circle. The pattern of the linear array and reflection coefficients in the composition of the cylindrical one were found. Using the corresponding frequency characteristics and direct numerical procedure the dependence of the matching characteristics and the radiation of the cylindrical array on the number of excited linear arrays and the number

of TEM horns in the linear array were studied. The results obtained using two modeling methods are close to each other. It is shown that a cylindrical array with 19 excited lines of 16 TEM horns is matched in a frequency band of more than 40:1.

**Key words:** cylindrical antenna array, ultra wide band antenna, over wave range antenna.

## Введение

В последнее время предложен новый класс сверхширокополосных антенных решеток – с полосой частот более 10:1, т.е. перекрывающих более одного диапазона волн. Такие (сверхдиапазонные) антенные решетки могут найти применение в многофункциональных многодиапазонных радиотехнических системах.

В работах [1, 2] исследованы кольцевые антенные решетки с рабочей полосой частот порядка 100:1. В качестве элементов решеток использованы новые типы TEM рупоров: несимметричный петлевой TEM рупор и рупоры в виде вырезки из поликонической антенны.

В работе [3 - 8] исследованы линейные и плоские решетки с полосой рабочих частот более 10:1.

Следует отметить, что линейные и кольцевые антенные решетки имеют сравнительно небольшое усиление, а недостатком плоских фазированных решеток является падение усиления с увеличением угла сканирования.

В работе [9] исследованы свехдиапазонные цилиндрические антенные решетки (ЦАР) биконусов и вырезок из биконусов. Полоса рабочих частот решеток ограничена ростом бокового излучения с частотой. При ограничении по уровню - 5 дБ и сканировании в азимутальной плоскости (*H*-плоскости) полоса рабочих частот - 45:1. Однако уровень бокового излучения – 5 дБ является неприемлемым для большинства практических применений.

Целью данной работы является исследование ЦАР ТЕМ рупоров с металлизацией межрупорного пространства и экраном.

### 1. Исследование характеристик согласования

Конструкция ЦАР приведена на рис.1. На рис. 1а показан элемент ЦАР (ТЕМ рупор), на рис. 1 б-г, соответственно, вид сбоку, сверху и общий вид ЦАР. ЦАР состоит из 40 линейных антенных решеток (ЛАР) ТЕМ рупоров, входы которых расположены на цилиндрической поверхности радиусом  $R_0=86$  мм. Внутри решетки находится соосный цилиндрический экран. ТЕМ рупор имеет размеры:  $W=1$  мм,  $L=100$  мм,  $P_x=30$  мм,  $P_y=20$  мм.

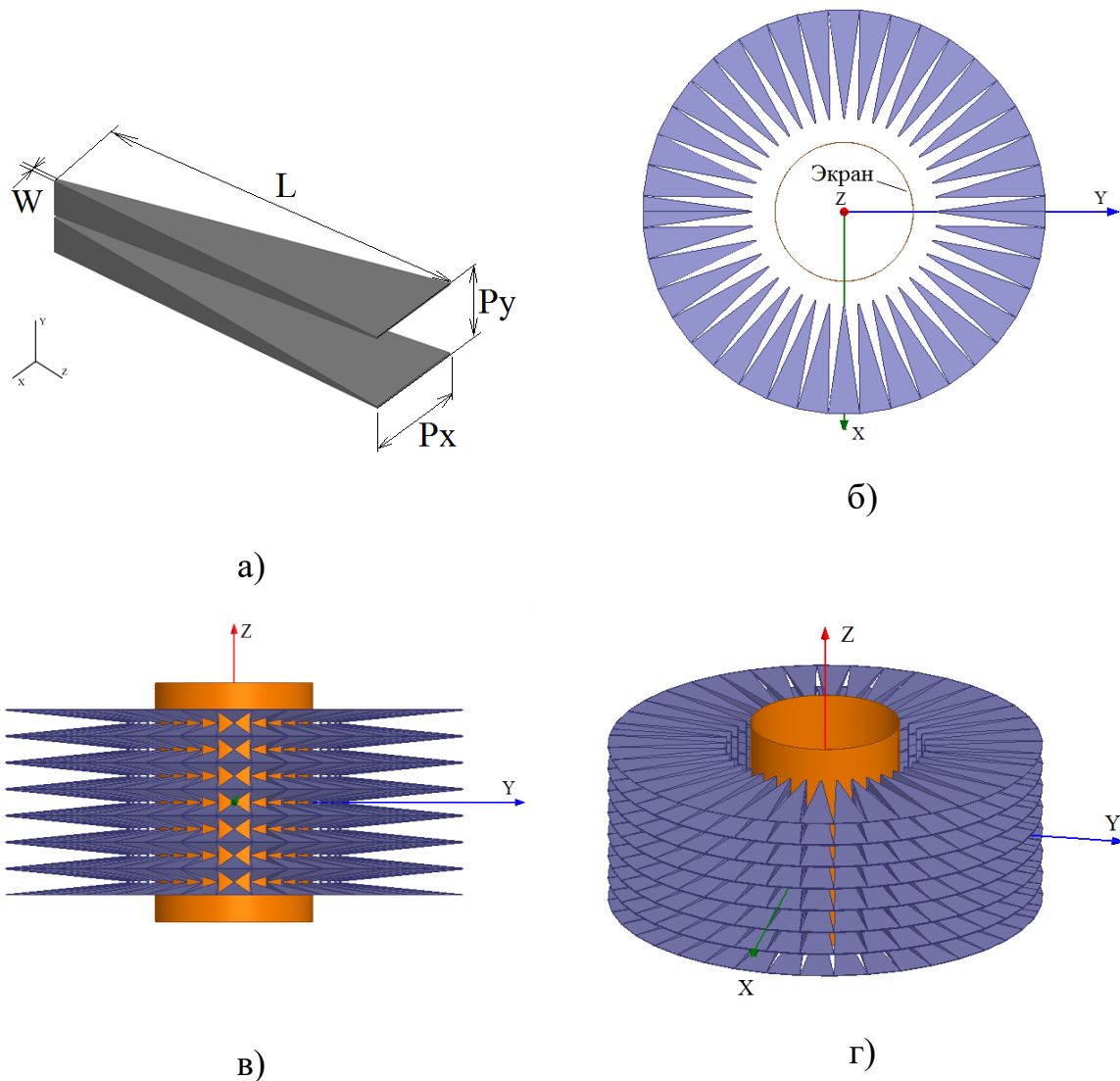


Рис. 1. Конструкция ЦАР.

Рассмотрим три варианта конструкции ЦАР: 1. ЛАР содержит 8 рупоров, радиус экрана  $R_1 = 26$  мм, 2. ЛАР содержит 8 рупоров, радиус экрана  $R_2 = 64$  мм, 3. ЛАР содержит 16 рупоров, радиус экрана  $R_1 = 26$  мм.

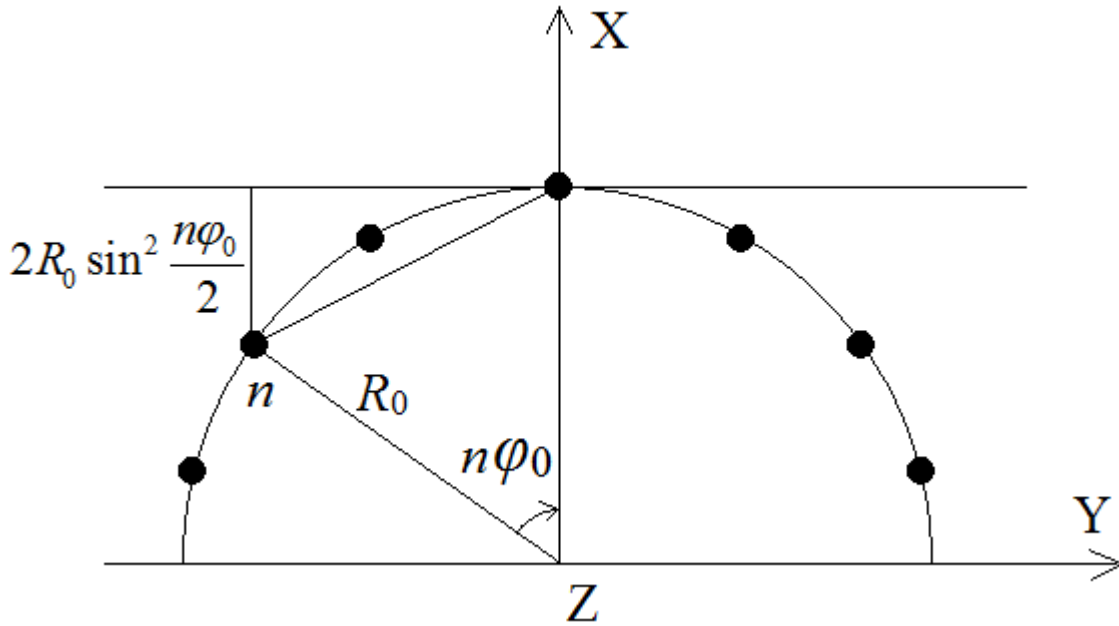


Рис. 2. Схема определения временной задержки.

Величину сдвига по времени (задержки) для  $n$ -ой ЛАР относительно центральной ЛАР, обеспечивающей формирование плоского фронта при излучении решётки вдоль оси X нетрудно получить из геометрии рис. 2. В результате, имеем:

$$\Psi_n = -2R_0 \sin^2 \frac{n\varphi_0}{2}, \quad (1)$$

где:  $n\varphi_0$  - угол между  $n$ -ой ЛАР и центральной ЛАР,  $\Psi_n$  - величина задержки

Коэффициент отражения решетки при этом определяется формулой;

$$R = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M [S_{nm} \exp(j(2\Psi_n))], \quad (2)$$

где:  $N$  – количество ЛАР,  $M$  – количество рупоров в ЛАР,  $S_{nm}$  – элементы матрицы рассеяния полотна ЦАР (коэффициенты связи).

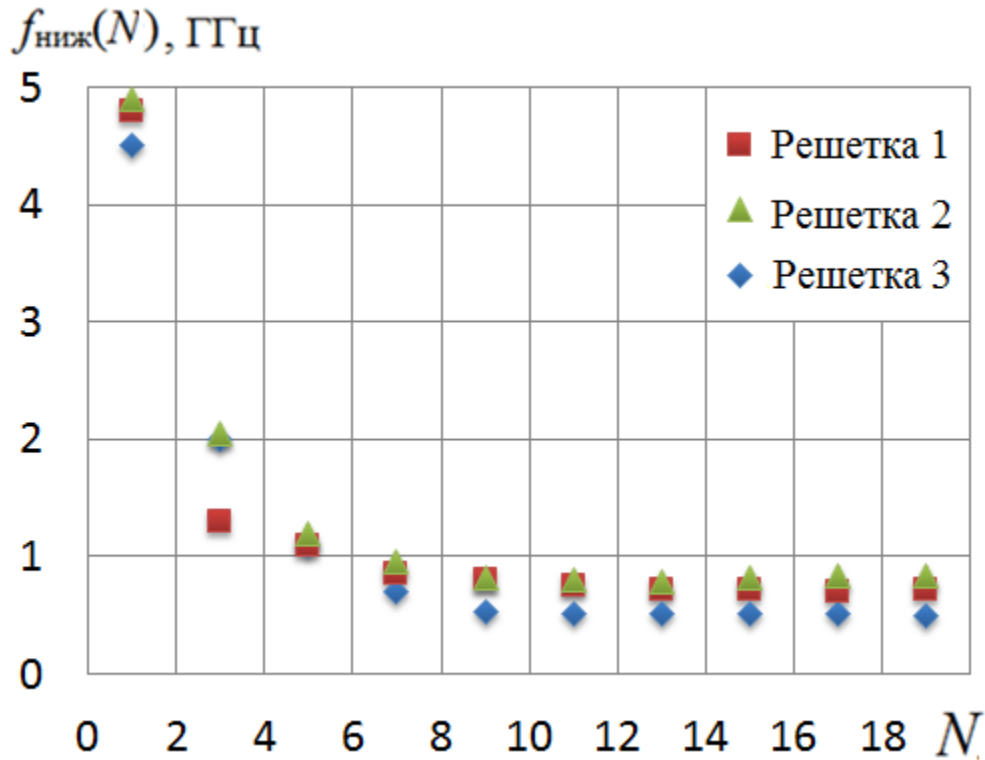
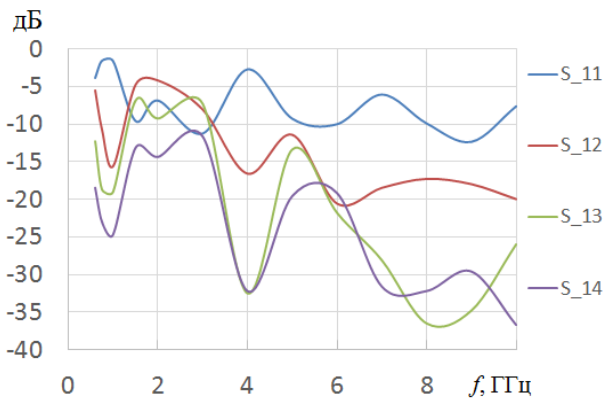


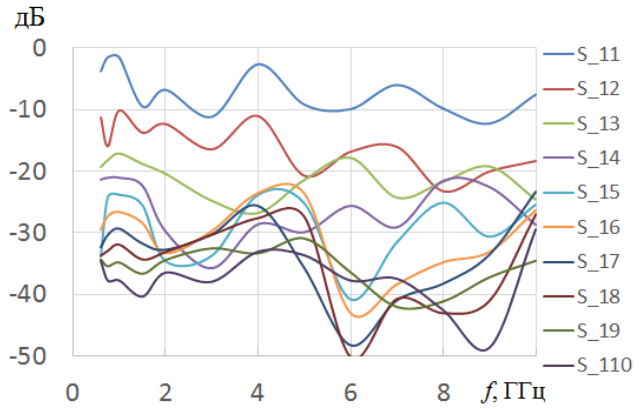
Рис.3. Зависимость нижней частоты согласования от числа ЛАР.

С использованием рассчитанных методом конечных элементов величин  $S_{nm}$  и формулы (2) было проведено исследование нижней частоты согласования ЛАР по уровню отражения -10 дБ в зависимости от числа возбужденных ЛАР. Результаты исследования приведены на рис. 3. На рисунке видно, что с увеличением числа возбужденных ЛАР для всех вариантов ЦАР нижняя частота уменьшается. При возбуждении 7 ЛАР и более нижняя частота уже практически не меняется и для трех вариантов ЦАР равна, соответственно, 0,7, 0,8 и 0,5 ГГц.

На рис.4-6 приведены частотные зависимости коэффициентов связи для трех вариантов ЦАР. На рисунках видно, что взаимодействие между элементами ЦАР достаточно сильное, причем между рупорами в ЛАР (по  $Z$ ) более сильное, чем между ЛАР (по  $\varphi$ ).

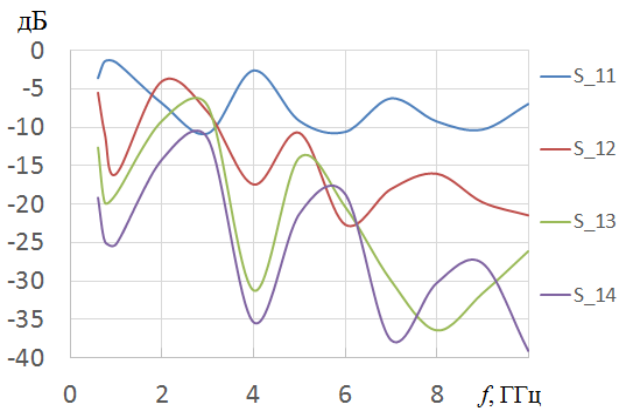


а) по Z

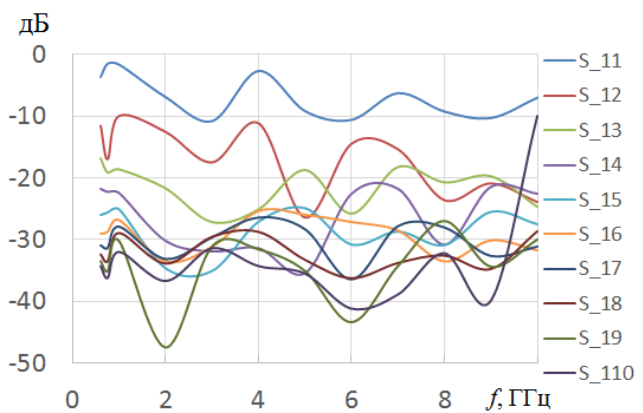


б) по φ

Рис. 4. Коэффициенты связи варианта 1.

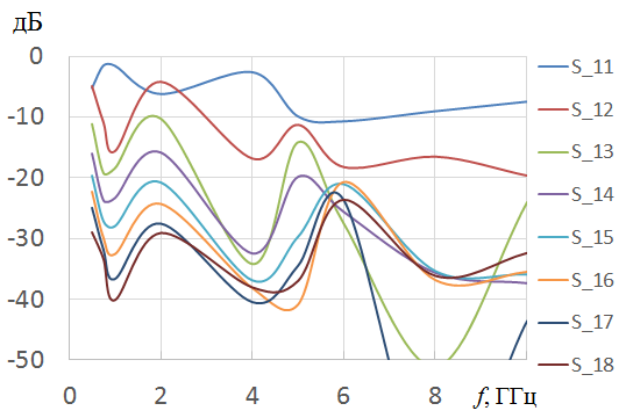


а) по Z

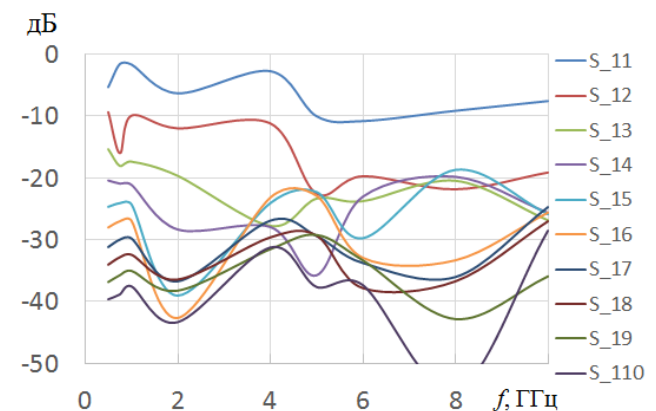


б) по φ

Рис. 5. Коэффициенты связи варианта 2.



а) по Z



б) по φ

Рис. 6. Коэффициенты связи варианта 3.

При возбуждении нескольких элементов происходит компенсация отраженных волн за счет взаимной связи элементов решетки. При этом именно сильная связь уменьшает величину коэффициента отражения на нижних частотах по сравнению с коэффициентом отражения отдельного элемента ( $S_{11}$ ). Это хорошо видно на рис. 7, на котором сплошной, штриховой и пунктирной линиями показаны частотные зависимости коэффициента отражения, соответственно, для 1, 2 и 3 варианта ЦАР с 19 возбужденными ЛАР в режиме формирования плоского фронта при излучении решётки вдоль оси X, рассчитанная с использованием формулы (2). Как видно на рис.7 полоса согласования первого, второго и третьего варианта ЦАР более 28:1, 25:1 и 40:1, соответственно.

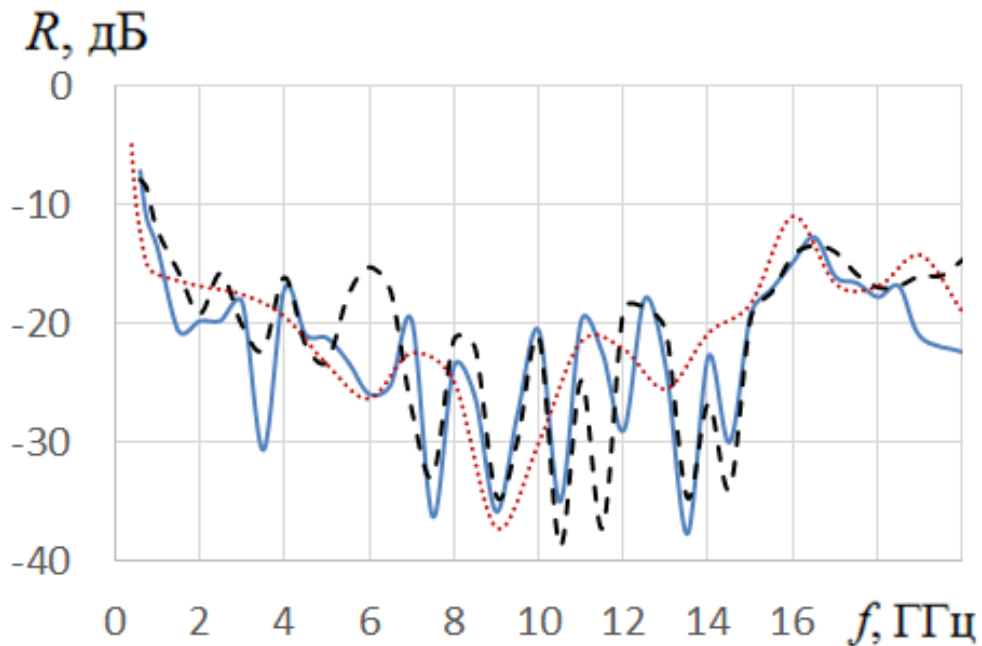


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения ЦАР с 19 возбужденными ЛАР от частоты.

## 2. Исследование характеристик излучения ЦАР

Далее с использованием метода конечных элементов были исследованы характеристики излучения для вариантов 1 и 2, у которых отличаются только диаметрами экрана.

При положении оси цилиндрической решётки в начале координат и положении центрального элемента ЛАР на оси X выражение для поля ЦАР с  $N$  симметрично

возбужденными ЛАР в дальней зоне можно представить в виде:

$$E_N = \sum_{n=\frac{-(N-1)}{2}}^{\frac{N-1}{2}} A(\varphi - n\varphi_0) \exp(i\Phi(\varphi - n\varphi_0)) \exp(i\Psi_n), \quad (3)$$

где  $A(\varphi), \Phi(\varphi)$  – соответственно, амплитудная и фазовая диаграммы ЛАР,  $N$  – (нечётное) число ЛАР.

На рис. 8 – рис. 10 показаны амплитудная и фазовая диаграммы ЛАР в азимутальной плоскости на частотах 1, 5 и 10 ГГц, соответственно. Сплошная линия на рисунках соответствует варианту 1, а штриховой варианту 2.

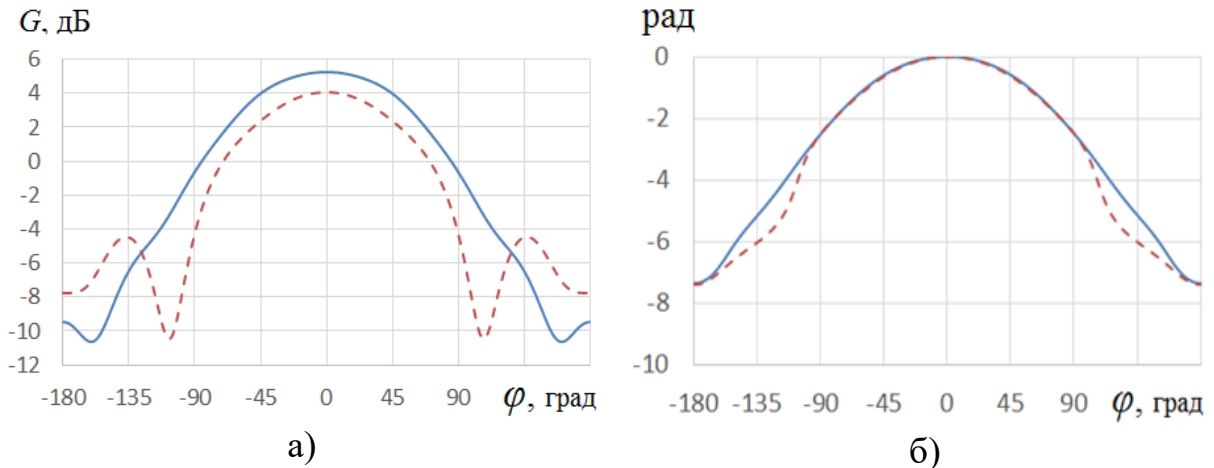


Рис. 8. Амплитудная (а) и фазовая (б) ДН ЛАР в составе ЦАР в Н плоскости на частоте 1 ГГц

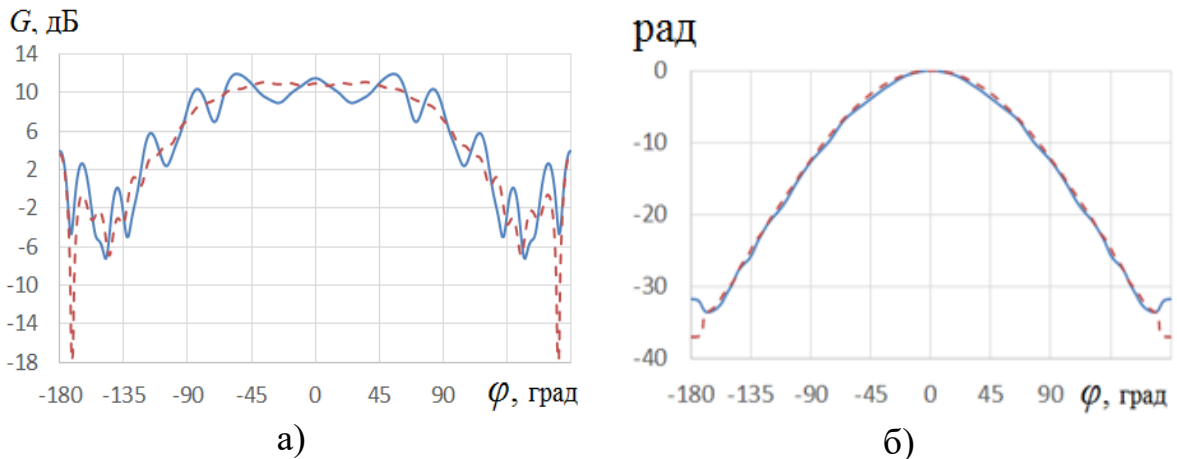


Рис. 9. Амплитудная (а) и фазовая (б) ДН ЛАР в составе ЦАР в Н плоскости на частоте 5 ГГц



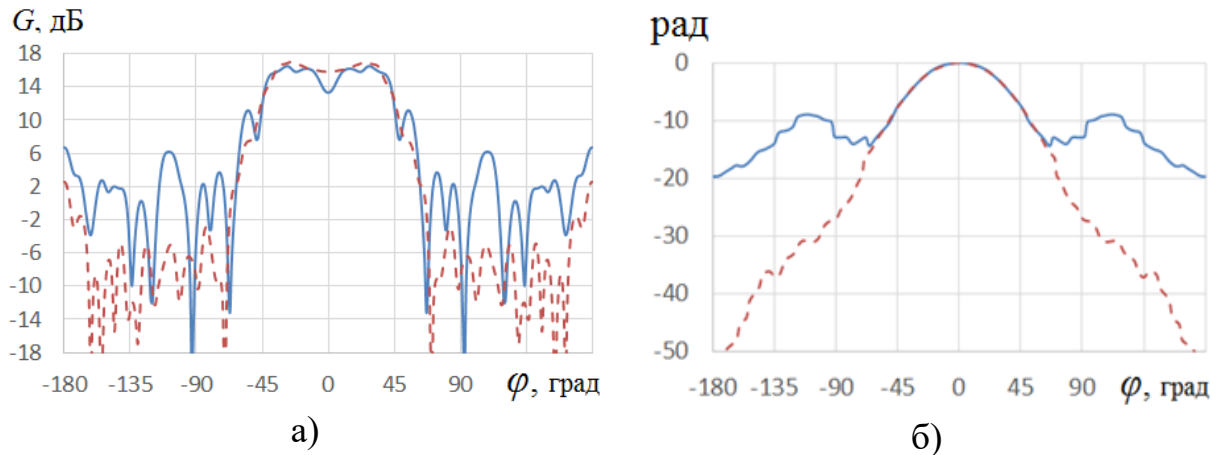


Рис. 10. Амплитудная (а) и фазовая (б) ДН ЛАР в составе ЦАР в Н плоскости на частоте 10 ГГц

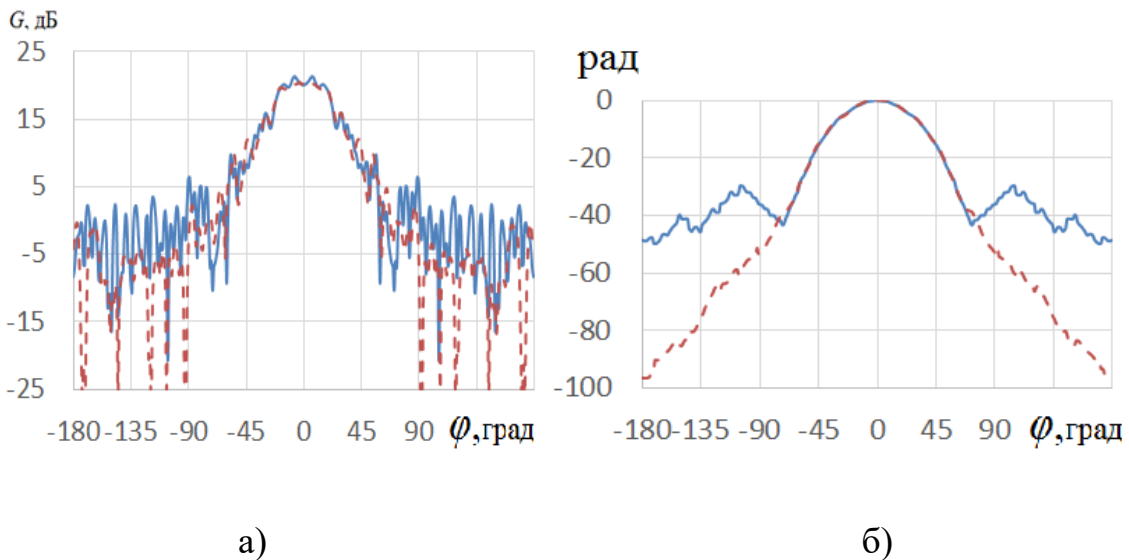


Рис. 11. Амплитудная (а) и фазовая (б) ДН ЛАР в составе ЦАР в Н плоскости на частоте 20 ГГц

На рис. 8 – 11 видно, что амплитудная и фазовая диаграммы варианта 2 на всех частотах более гладкие, чем варианта 1.

Далее с использованием формулы (3) и прямой численной процедуры проведено исследование ДН на частотах 1, 5 и 10 ГГц для вариантов 1, 2 в зависимости от числа возбужденных ЛАР. Результаты расчетов ДН в Н – плоскости представлены на рис. 11 – 13, а в Е-плоскости - на рис. 14 – 16. Кривыми 1 – 4 на рисунках представлены ДН ЦАР для  $N= 5, 9, 13, 17$ ,

соответственно. Сплошными линиями здесь и дальше – результаты расчета по формуле (3), штриховыми – с использованием прямой численной процедуры.

На рис. 12 – 15 видно, что с увеличением числа возбужденных ЛАР до 17 линеек на низких и средних частотах лучи сужаются, а на высоких частотах, с увеличением  $N$ , начиная с  $N=13$ , лучи начинают расширяться, а боковые лепестки - расти. Особенно заметен этот эффект для варианта 1.

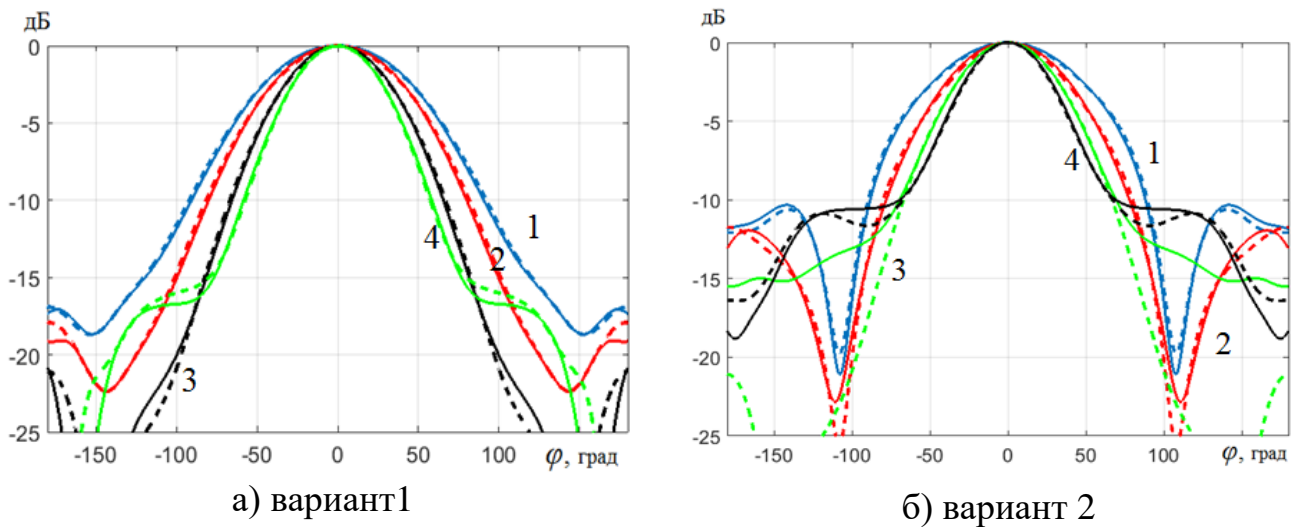


Рис. 12. ДН ЦАР в Н - плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 1 ГГц

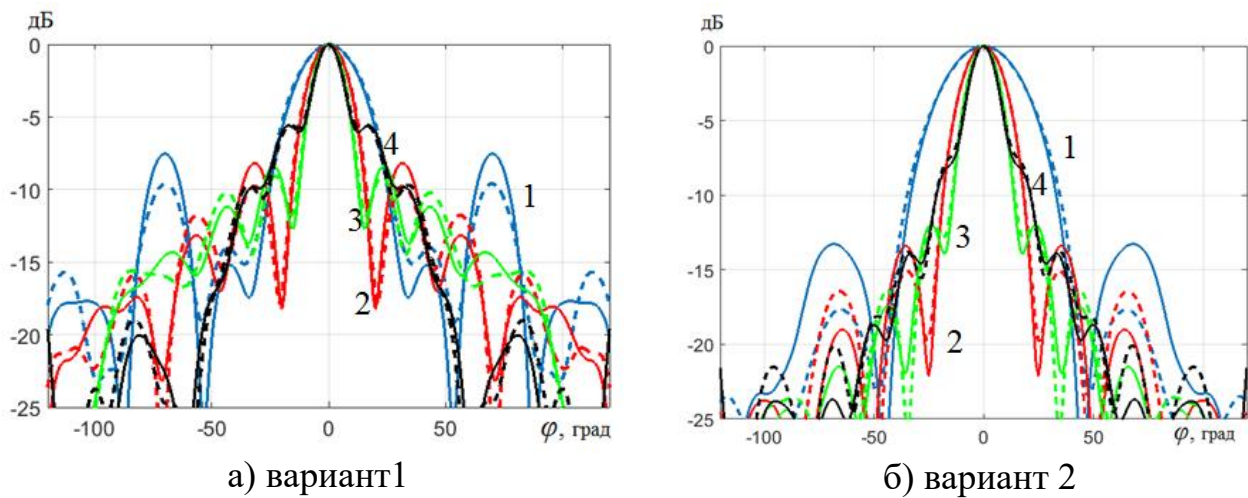


Рис. 13. ДН ЦАР в Н - плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 5 ГГц

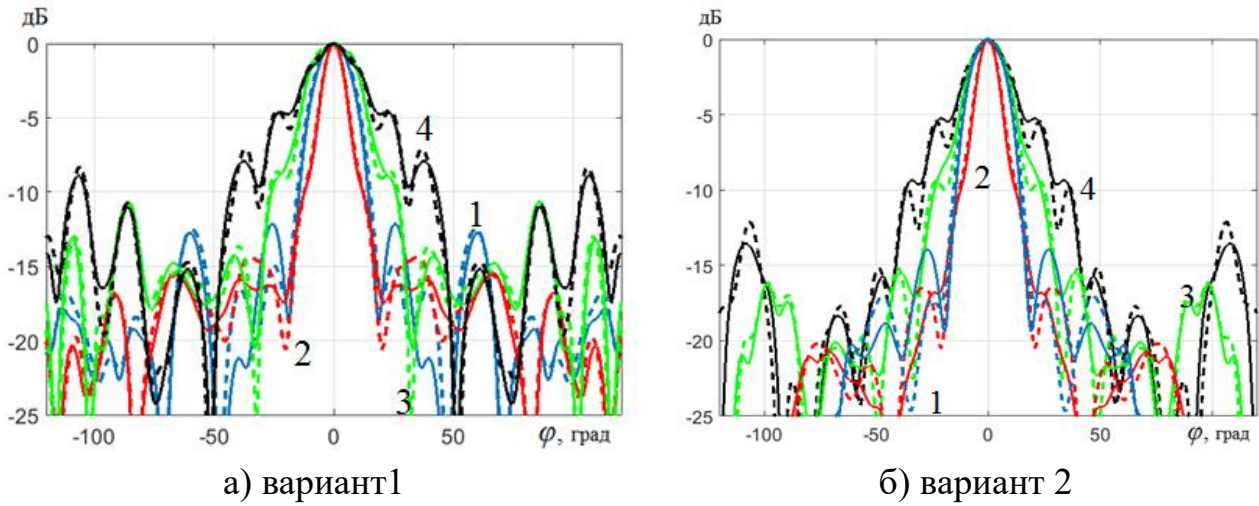


Рис. 14. ДН ЦАР в Н - плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 10 ГГц

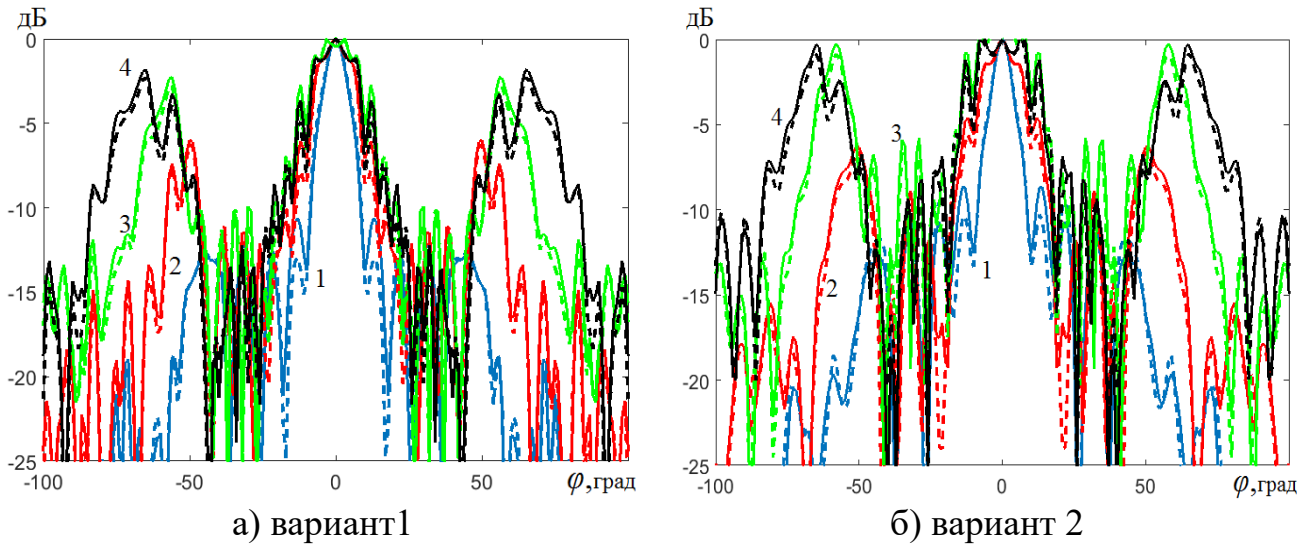
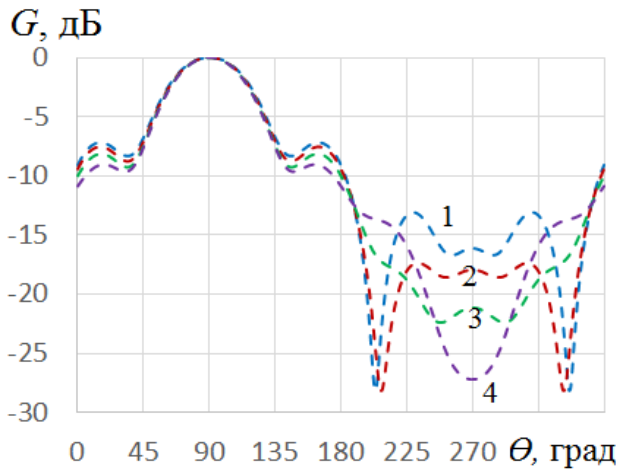
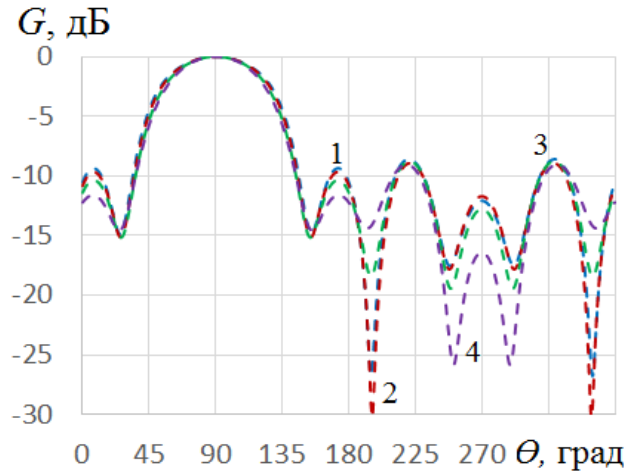


Рис. 15. ДН ЦАР в Н - плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 20 ГГц

На рис. 14 – 16 видно, что при изменении числа возбужденных ЛАР меняется только уровень боковых лепестков ДН, причем наиболее заметно для варианта 1.

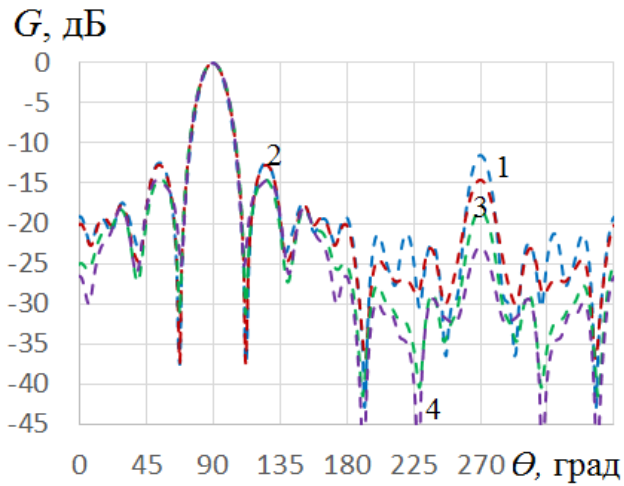


а) вариант 1

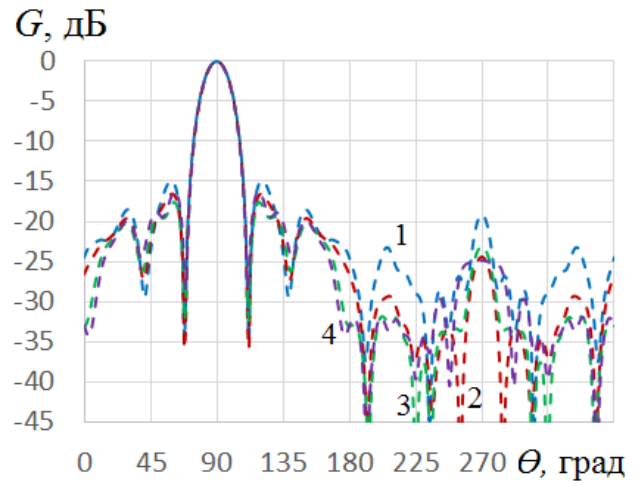


б) вариант 2

Рис. 16. ДН ЦАР в Е- плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 1 ГГц

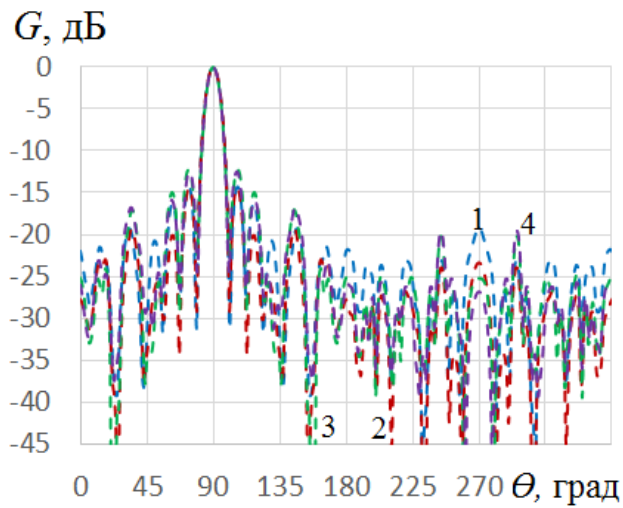


а) вариант 1

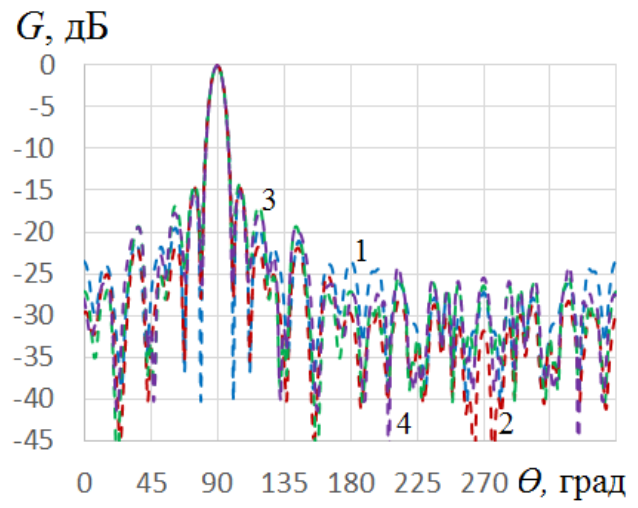


б) вариант 2

Рис. 17. ДН ЦАР в Е- плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 5 ГГц

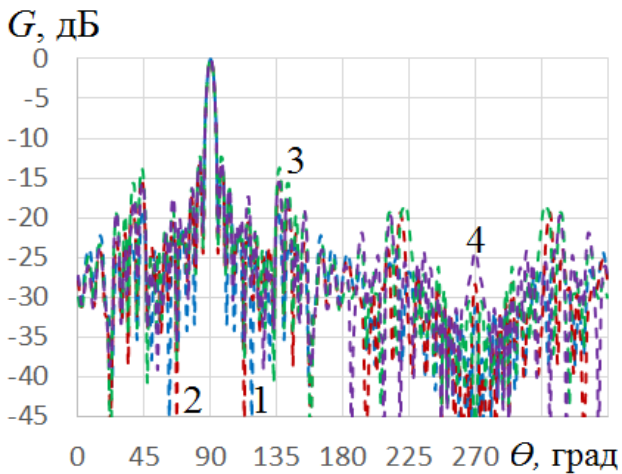


а) вариант 1

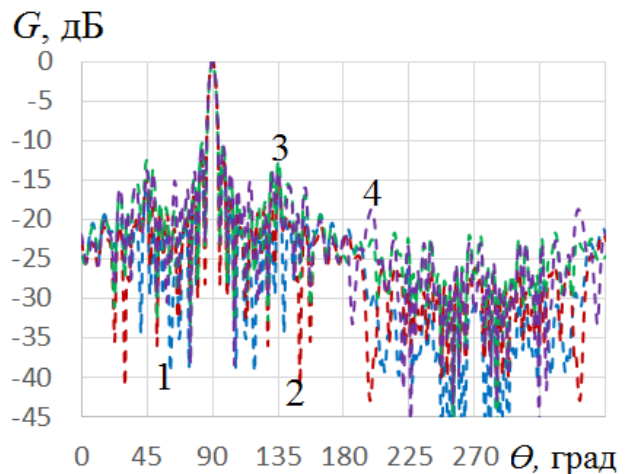


б) вариант 2

Рис. 18. ДН ЦАР в Е- плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 10 ГГц



а) вариант 1



б) вариант 2

Рис. 19. ДН ЦАР в Е- плоскости в зависимости от числа возбужденных ЛАР на частоте 20 ГГц

Результаты расчета коэффициента усиления ЦАР на четырех частотах приведены на рис.20.

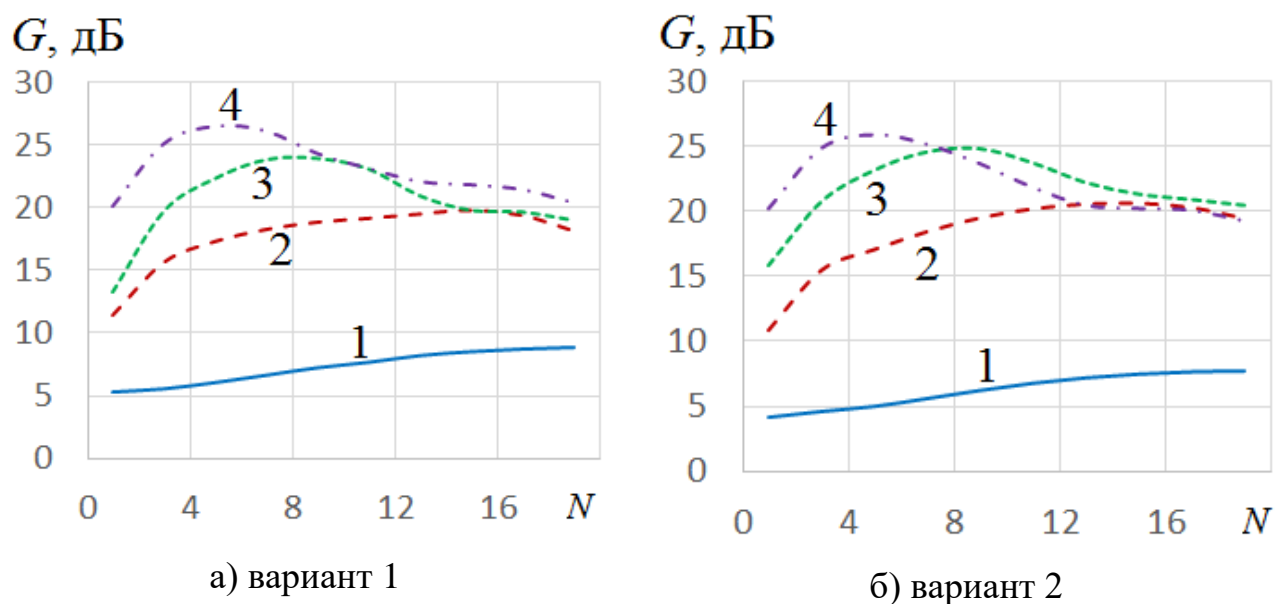


Рис. 20. Зависимость коэффициента усиления ЦАР от числа возбужденных ЛАР на частотах: 1 ГГц – кривая 1, 5 ГГц – кривая 2, 10 ГГц – кривая 3, 20 ГГц – кривая 4.

На рис. 20 видно, что для обоих вариантов с увеличением числа возбужденных ЛАР усиление ЦАР растет, но, начиная с определенного числа, рост замедляется, а затем происходит падение, причем это число уменьшается с увеличением частоты. Тем не менее, с увеличением частоты при оптимальном числе возбужденных линеек усиление ЦАР – растет.

### Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Все исследованные варианты полотна цилиндрической антенной решетки, содержащей 40 линейных решеток ТЕМ рупоров с металлизацией межрупорного пространства и экраном обеспечивает сверхдиапазонный режим работы.
2. Для каждой частоты существует оптимальное число возбужденных ЛАР, которое обеспечивает максимальную величину коэффициента усиления ЦАР. Эта величина растет с увеличением частоты.

3. Результаты расчета зависимостей ДН в зависимости от числа возбужденных ЛАР двумя использованными в работе методами близки между собой.

## Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-07- 00655а.

## Литература

1. Бирюков В.Л., Ефимова Н.А., Калинин В.И., Калошин В.А., Пангонис Л.И. Исследование сверхширокополосной кольцевой антенной решетки // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/20/text.pdf>
2. Бирюков В.Л., Дупленкова М.Д., Калинин В.И., Калошин В.А. Исследование фрагмента сверхширокополосной кольцевой антенной решетки для сканирования в полусфере // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 1. URL <http://jre.cplire.ru/jre/jan14/21/text.pdf>
3. Калошин В.А., Нгуен К.З. Сверхдиапазонные излучатели и антенные решетки на основе биконических рупоров // Антенны. 2016. №8. С.69-76.
4. Калошин В.А., Нгуен К.З. Исследование характеристик СШП плоских двумерно-периодических решеток ТЕМ рупоров // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may17/14/text.pdf>
5. Банков С.Е, Калошин В.А, Ле Н.Т. Исследование характеристик двумерной сканирующей решетки ТЕМ – рупоров с металлизацией межрупорного пространства // РЭ. 2018. Т. 63. №12. С. 1263 – 1276.
6. Калошин. В.А., Ле. Н.Т. Двумерно – периодическая двух- поляризационная сверхдиапазонная антенная решетка // VI Всероссийская Микроволновая конференция. Доклады. М. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН. Ноябрь 2018. С. 194 – 198.
7. Калошин В.А., Ле Н.Т. Двумерно – периодическая двух- поляризационная сверхдиапазонная антенная решетка // РЭ. 2019. Т. 64. №11. С.1126 – 1137.

8. Калошин В.А., Ле Н.Т. Исследование плоской двумерно – периодической сверхдиапазонной антенной решетки с системой питания // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 3. <http://jre.cplire.ru/jre/mar20/8/text.pdf>
9. Калошин В.А., Ле Н.Т. Исследование характеристик сканирования в Н – плоскости сверхширокополосных цилиндрических антенных решеток биконических элементов // РЭ. 2019. Т. 64. № 5. С. 447-454.

**Для цитирования:**

Калошин В.А., Ле Н.Т., Фролова Е.В. Сверхдиапазонная цилиндрическая антенная решетка ТЕМ рупоров. Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr20/2/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.4.2