

DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.9

УДК 621.396.67

МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ В E-ПЛОСКОСТИ

В. А. Калошин¹, К. Т. Нгуен²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125007, Москва, Моховая, 11-1

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

Статья поступила в редакцию 31 мая 2020 г.

Аннотация. С использованием численного эксперимента исследованы возможности построения многоканальных волноводных делителей мощности. Для электродинамического моделирования использован метод конечных элементов. В широкой полосе частот исследованы характеристики трех, четырех, шести и восьмиканальных делителей с равномерным синфазным делением мощности на основе тройника - ответвителя, плавных и линейных волноводных переходов с корректирующими линзами, а также E-секториального рупора.

Ключевые слова: многоканальный делитель, волноводный делитель, E-плоскость, широкая полоса частот.

Abstract. Using a numerical experiment the possibilities of design of multichannel waveguide power dividers are investigated. The finite element method is used for electrodynamic modeling. In a wide frequency band the characteristics of three, four, six, and eight-channel dividers with uniform in-phase power division based on a tee-coupler, smooth and linear waveguide transitions with corrective lenses, and an E-sector horns were studied.

Keywords: multichannel divider, waveguide divider, E-plane, wide frequency band.

Введение

Многоканальные волноводные делители с равномерным распределением мощности на выходах широко используются при построении антенных решеток с

высоким коэффициентом использования поверхности. В связи с этим исследованию волноводных делителей посвящено большое количество работ. Основной интерес в последнее время связан с разработкой и исследованием H-плоскостных волноводных делителей, что объясняется возможностью использования SIW технологии для их изготовления [1-6]. Однако, когда возникает необходимость создания E-плоскостных линейных волноводных решеток, возникает задача создания многоканального волноводного делителя мощности в E-плоскости. Широкополосный делитель такого типа может быть реализован при использовании T-образного двухканального делителя и корпоративной многоэтажной схемы [7]. Однако при увеличении числа выходов делителя и соответствующего увеличению числа этажей корпоративной схемы из-за взаимодействия между этажами растут потери и появляются резонансы частотной характеристики коэффициента отражения, что, в свою очередь, приводит к сужению полосы рабочих частот.

Другой путь построения многоканального волноводного делителя мощности заключается в использовании параллельной схемы. В работе [8] предложен и исследован такой делитель мощности в E-плоскости с четырьмя выходами. Однако только два выхода являются рабочими, а два других (с поглощающими нагрузками) используются для увеличения развязки в режиме суммирования мощности.

Многоканальный волноводный делитель с равномерным делением мощности может быть построен на основе волноводного перехода в E-плоскости или E-секториального рупора. При этом, как правило, возникает задача выравнивания распределения мощности между выходами, которая в [9] решается введением в конструкцию делителя поглощающих пластин. Однако такой способ приводит к увеличению тепловых потерь делителя и уменьшению пропускаемой мощности.

В данной работе исследуются возможности построения многоканальных Е-плоскостных волноводных делителей, в которых равномерность распределения мощности обеспечивается за счет оптимальной геометрии делителя.

1. Трехканальный делитель - ответвитель

Общий вид трехканального делителя мощности в Е-плоскости и его продольное сечение показаны на рис.1а, б, соответственно. Входное сечение волновода 23x10 мм.

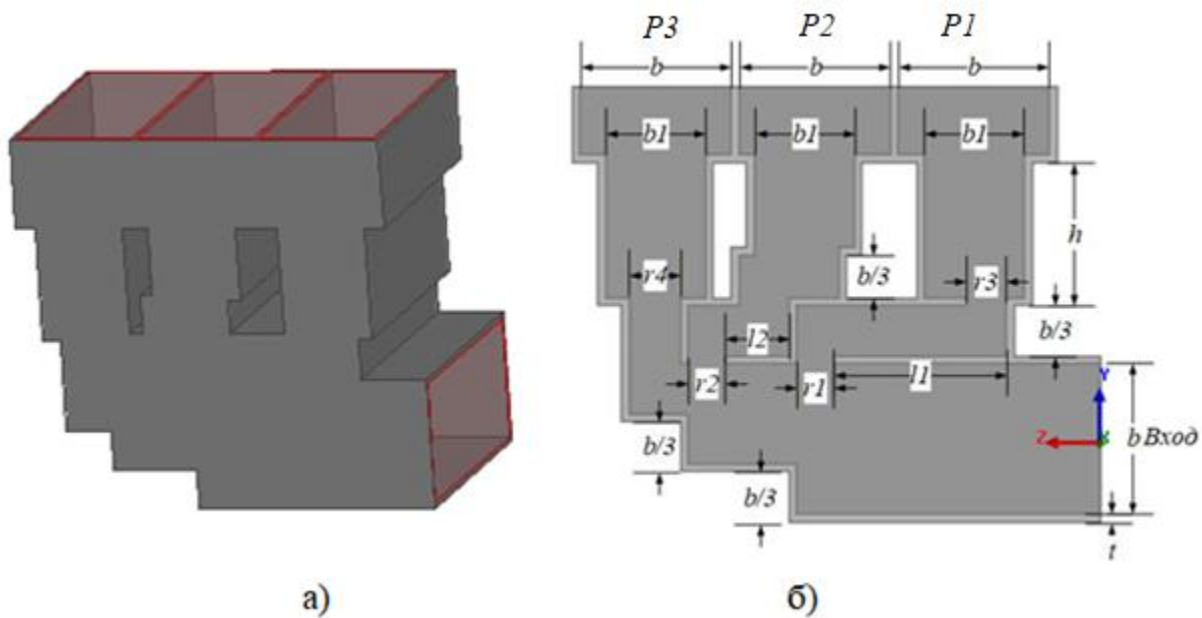


Рис.1. Трехканальный делитель мощности.

Параметры оптимизации по критериям ширины полосы согласования, равномерности распределения мощности и фазы в каналах делителя показаны на рис.5б. В результате оптимизации были получены следующие параметры геометрии делителя: $t=0.5$ мм, $b=10$ мм, $b1= 2b/3$, $l1=11.38$ мм, $l2=4.2$ мм, $r1=r2=2.45$ мм, $r3=2.73$ мм и $r4=3.83$ мм. На рис.2 показаны частотные зависимости коэффициента отражения (кривая 1) и коэффициента передачи в первый (от входа), второй и третий канал (кривые 2, 3, 4 соответственно). На рисунке видно, что коэффициент отражения в полосе частот от 8.8 до 11 ГГц менее -20 дБ, причем в этой полосе разница в коэффициентах передачи в каналах

менее 0.25 дБ. По уровню ототражения -15 дБ полоса частот составит более 2.5 ГГц.

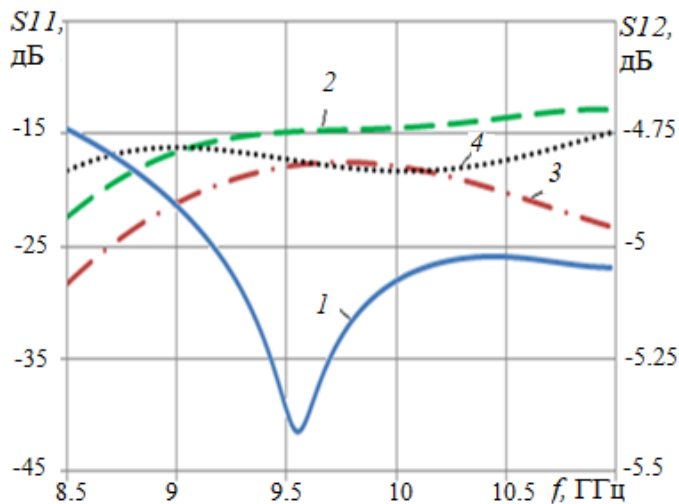


Рис.2. Частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи трехканального делителя.

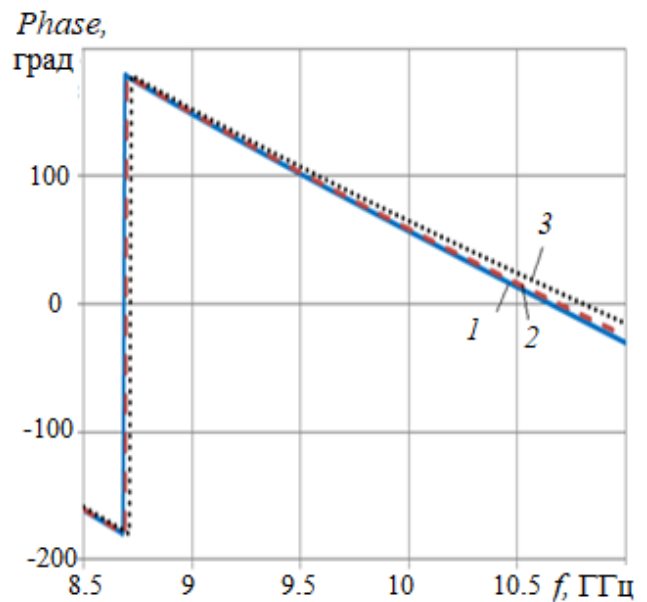


Рис.3. Частотные зависимости фазы на выходах трехканального делителя.

На рис. 3 кривыми 1, 2, 3 показаны зависимости фазы в трёх выходных каналах делителя от частоты. На рисунке видно, что в диапазоне частот 8.5 - 11 ГГц фазы каналов отличаются менее чем на 15 градусов. Таким образом, рабочая полоса частот делителя составляе 8.8 – 11 ГГц (22 %).

2. Четырехканальный делитель на основе плавного перехода

Если разделить выходное сечение плавного волноводного перехода на одинаковые одномодовые сечения, то мы получим многоканальный делитель мощности. Если на выходе перехода при этом отсутствуют возбужденные высшие моды, мы имеем равномерное синфазное распределение мощности в на выходах такого делителя.

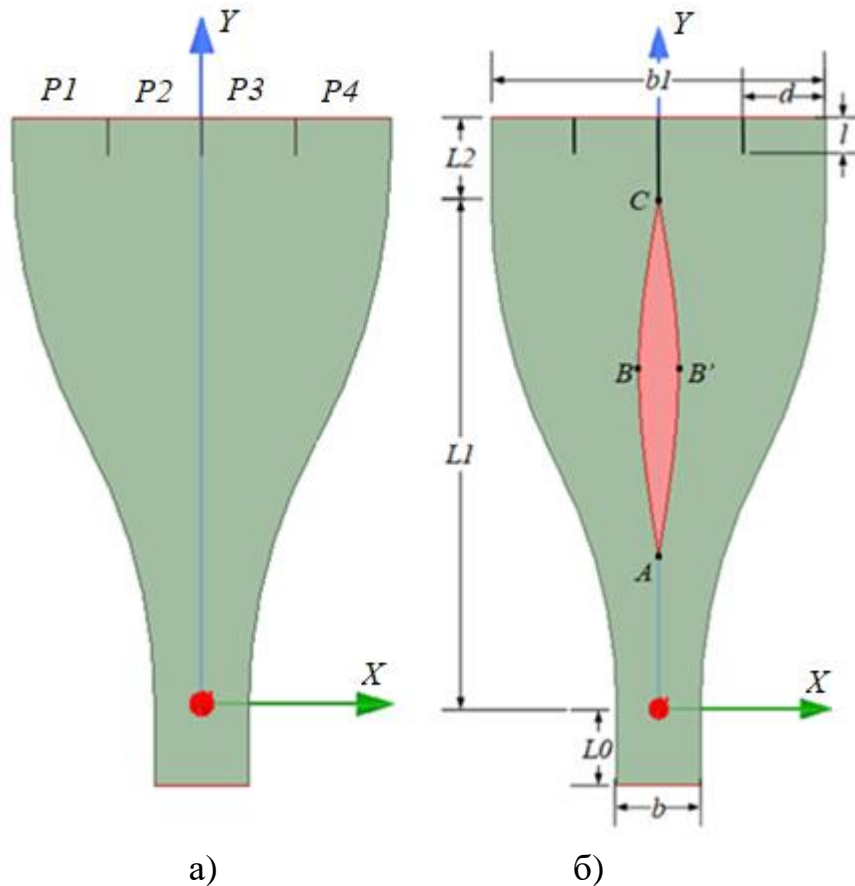


Рис.4. Делитель мощности в виде плавного перехода в Е-плоскости.

На рис. 4 представлены два варианта делителя в виде плавного перехода в Е-плоскости одномодового прямоугольного волновода на повышенное сечение. Образующие криволинейных стенок перехода являются сопряженными дугами окружностей. В качестве параметров использованы параметры перехода, оптимизированного в работе [10]: $b=3.4$ мм, $b1=13.6$ мм, $L0=3$ мм, $L1=20$ мм, $L2=3.3$ мм, $d=b=3.4$ мм, $l=1.4$ мм. Второй вариант делителя (рис.4б) отличается наличием перегородки, образованной дугами окружностей, которая разделяет переход на две части. Длина криволинейной части перегородки $AC = 12$ мм, максимальная толщина $BB' = 1.6$ мм, расстояние от входа – 6 мм.

На рис.5 представлены зависимости коэффициентов отражения делителей от частоты. Номер кривой соответствует номеру варианта делителя.

На рис.6 показаны зависимости модуля, а на рис. 7 фазы коэффициента передачи делителя от частоты.

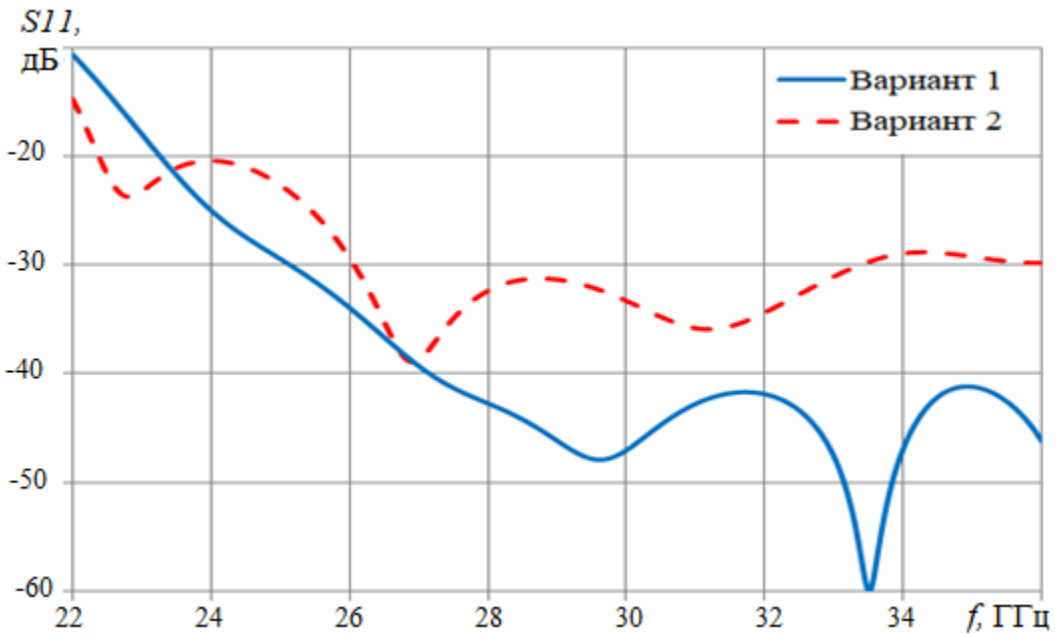


Рис.5. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

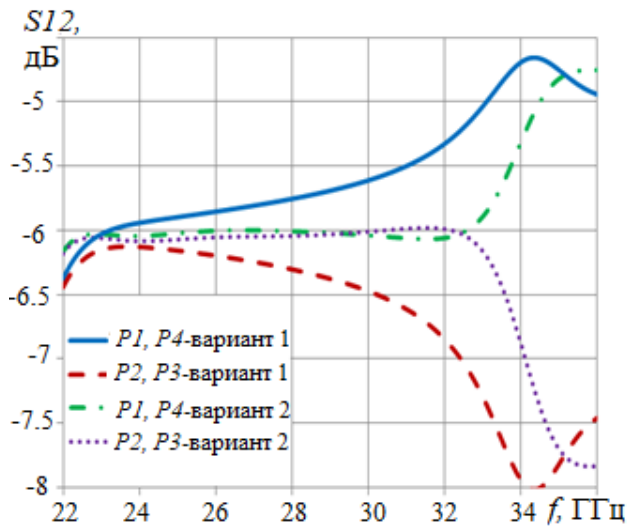


Рис.6. Зависимость коэффициента передачи на выходные каналы от частоты.

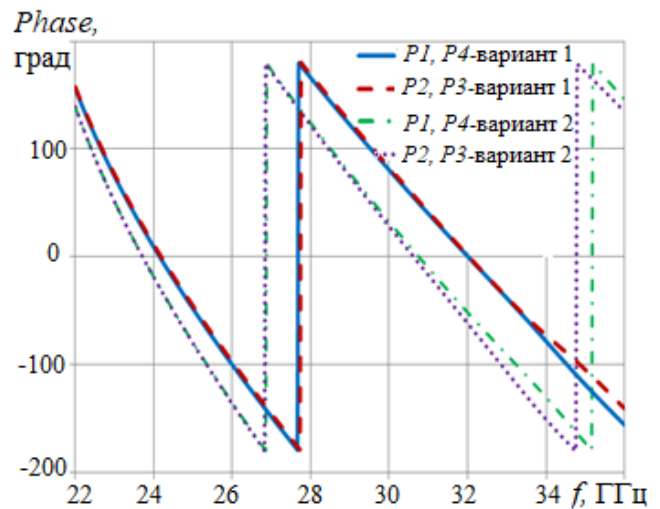


Рис.7. Зависимость фазы выходных каналов от частоты.

На рисунках видно, что полоса частот согласования по уровню -20 дБ у делителя 2 (нижняя частота – 22.4 ГГц) больше, чем у делителя 1 (нижняя частота – 23.3 ГГц). При этом неравномерность распределения мощности в полосе частот 22 – 33 ГГц у делителя 1 (менее 0.1дБ) существенно меньше, чем у делителя 2. Разница фаз на выходах делителя 2 растет с частотой немного

быстрее, чем у делителя 1, при этом в полосе 22 – 33 ГГц не превышает 17 градусов. Таким образом, рабочая полоса частот делителя составляет 22.5 – 33 ГГц (38%).

Увеличение числа выходных каналов делителя требует соответствующего увеличения размера сечения плавного перехода в Е-плоскости, что приводит к сужению полосы частот [10]. Поэтому далее рассмотрим другие варианты построения делителя мощности.

3. Многоканальный делитель на основе линейного перехода с диэлектрической линзой

На рис.8 показано продольное сечение делителя мощности на основе линейного перехода с диэлектрической линзой и согласующими элементами. Такой переход исследован в работе [10], где найдены оптимальные параметры. Другие параметры делителя $d=3.5$ мм, $l=2$ мм, $L=3$ мм показаны на рисунке.

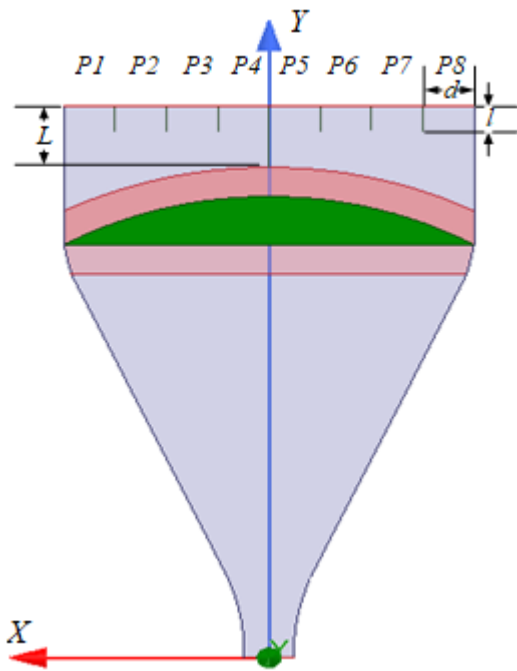


Рис.8. Делитель на основе перехода с диэлектрической линзой.

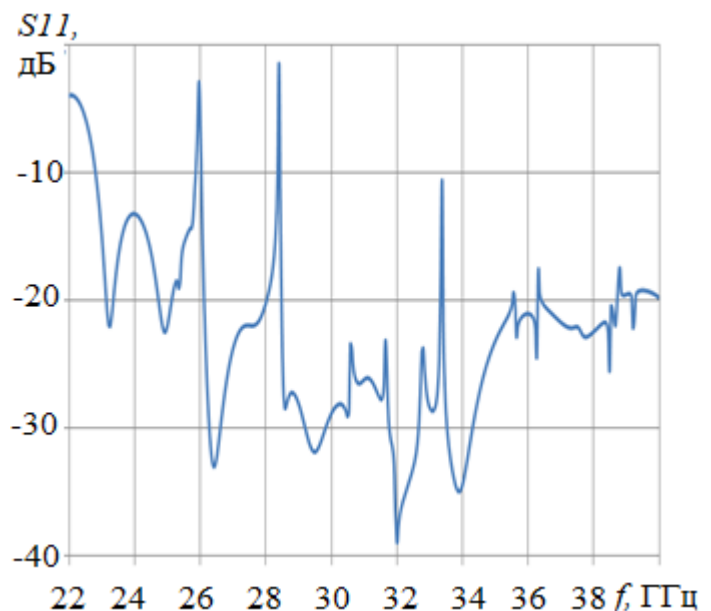


Рис.9. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

На рис. 9, 10 показаны частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи, соответственно.

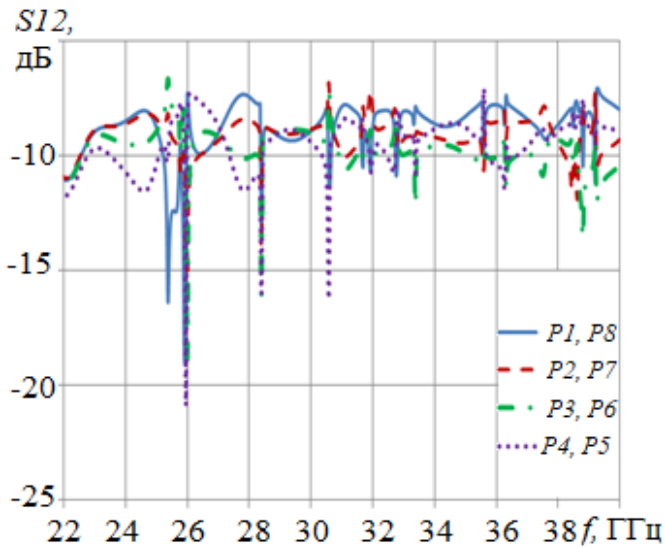


Рис.10. Зависимость коэффициента передачи на выходные каналы от частоты.

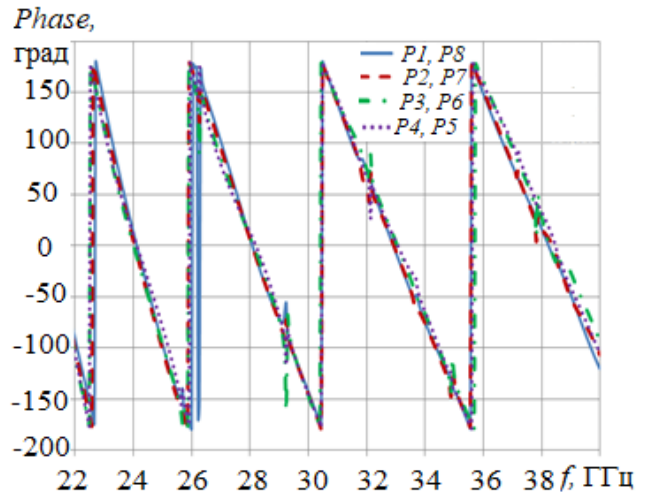


Рис.11. Зависимость фазы выходных каналов от частоты.

На рис.11 показаны зависимости фазы коэффициентов передачи от частоты. На всех рисунках отчетливо видны частотные резонансы, резко сужающие полосу рабочих частот делителя.

4. Многоканальный делитель на основе линейного перехода с металло-воздушной линзой

На рис.12 показан делитель на основе перехода с металло-воздушной линзой в виде тороидального изгиба, исследованный в работе [10]. Параметры, указанные на рисунке: $d=3.5$ мм, $l=2$ мм, $L=3$ мм.

На рис. 13, 14 показаны частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и передачи, соответственно.

На рис.15 показаны зависимости фазы выходных каналов от частоты. На рисунках, как и случае делителя на основе линейного перехода с диэлектрической

линзой, имеются частотные резонансы, резко сужающие полосу рабочих частот делителя.

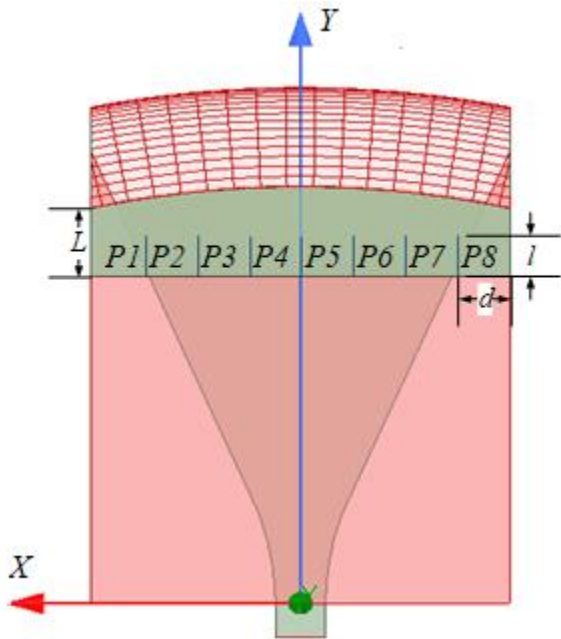


Рис.12. Делитель на основе перехода с металло-воздушной линзой.

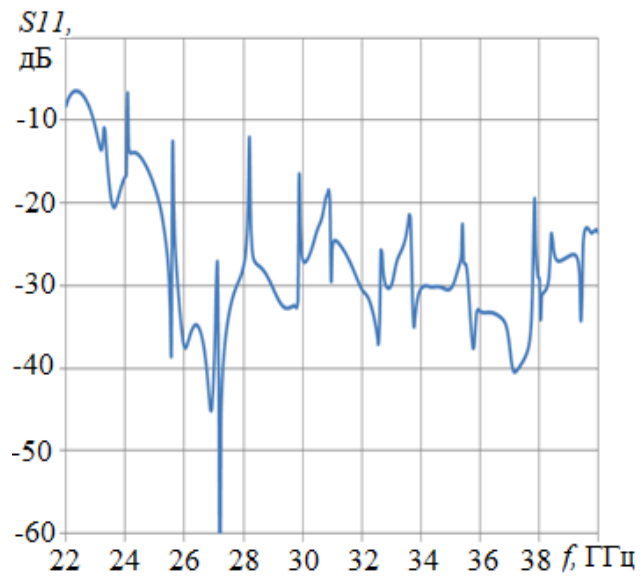


Рис.13. Зависимость коэффициента отражения от частоты.

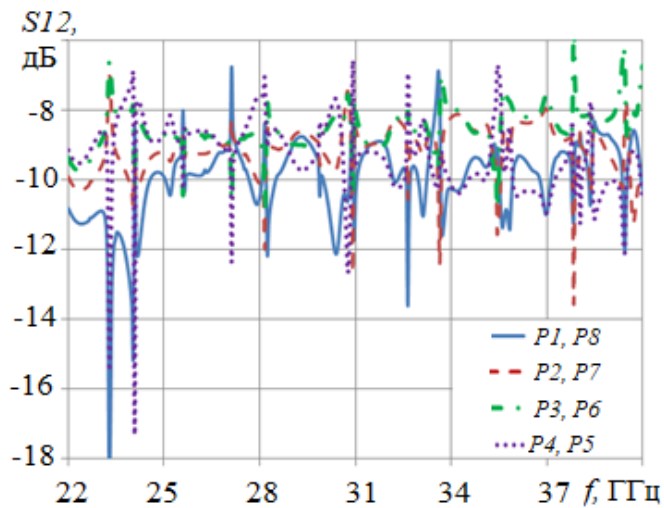


Рис.14. Зависимость коэффициента передачи на выходные каналы от частоты.

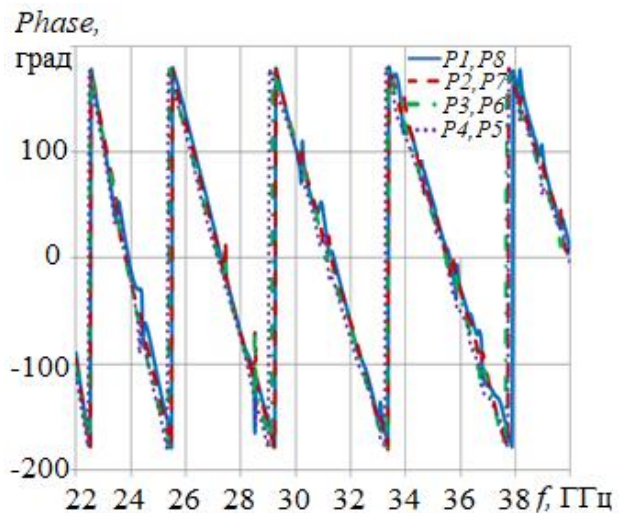


Рис.15. Зависимость фазы выходных каналов от частоты.

5. Многоканальные делители на основе E-секториального рупора

Прежде чем переходить к исследованию делителей на основе E-секториального рупора, проведем исследование амплитудно-фазового распределения электрического поля в E-плоскости рупора от угла раствора 2β (рис.16).

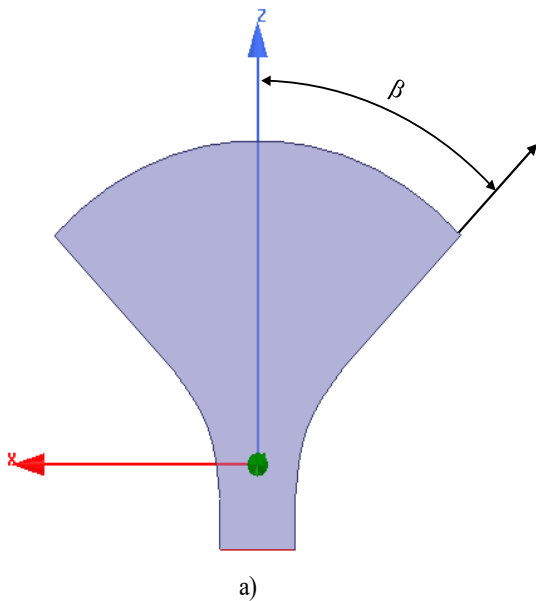


Рис.16. E- секториальный рупор.

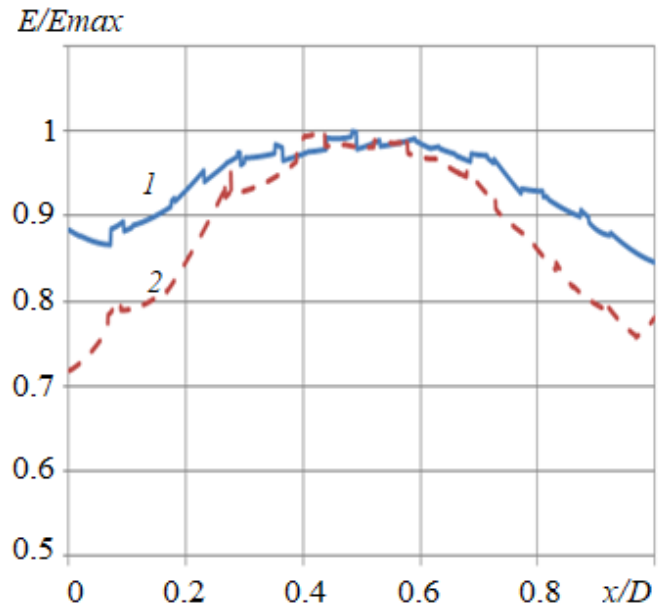


Рис.17. Распределение амплитуды поля.

На рис.17 представлены результаты расчета нормированного распределения электрического поля на дуге раскрыва рупора для угла раствора $\beta_1=45^\circ$ (1) и $\beta_2=60^\circ$ (2). На рис.18 в тех же обозначениях показаны фазовые распределения электрического поля на дуге раскрыва.

На рисунках видно, что с увеличением угла раствора неравномерность как амплитудного, так и фазового распределения увеличивается. При уменьшении угла раствора будет увеличиваться длина делителя (при том же числе выходов). Поэтому далее рассмотрим делители на основе E-секториального рупора с углом раствора $2\beta_1$. Начнем с шестиканального делителя 1 с равномерным расположением волноводных выходов по дуге раскрыва (рис.19). Зависимость

коэффициентов передачи одной половины делителя показаны на рис.20 соответствующими кривыми 1,2,3.

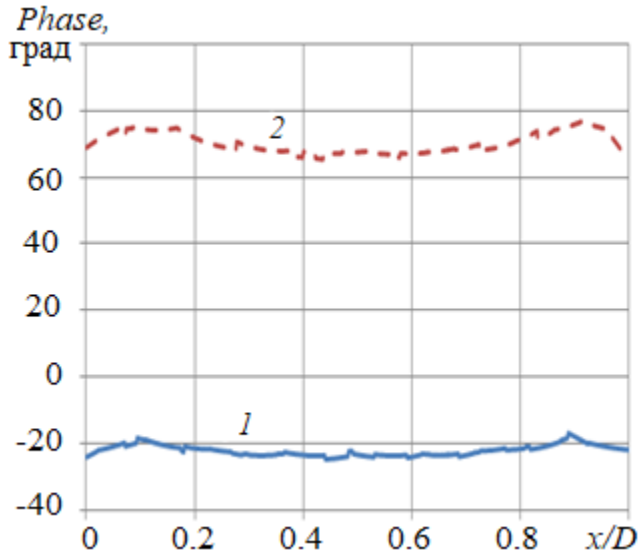


Рис.18 . Фазовое распределение.

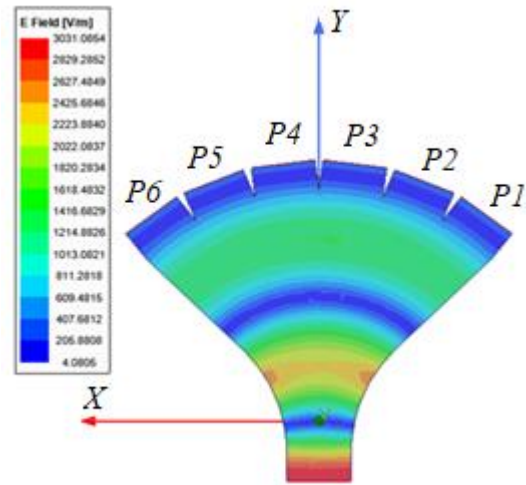


Рис.19. Шестиканальный делитель 1.

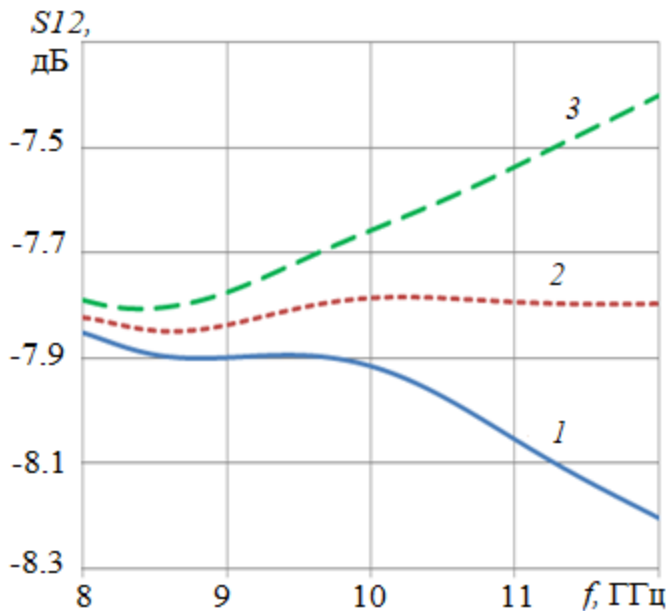


Рис.20. Коэффициенты передачи делителя 1э.

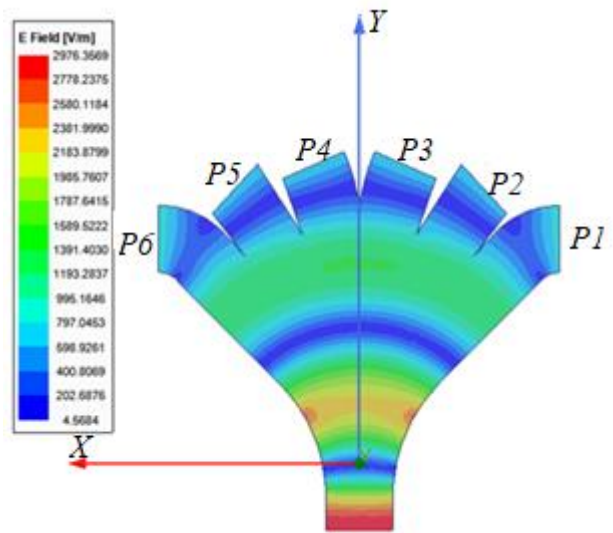


Рис.21. Шестиканальный делитель 2э.

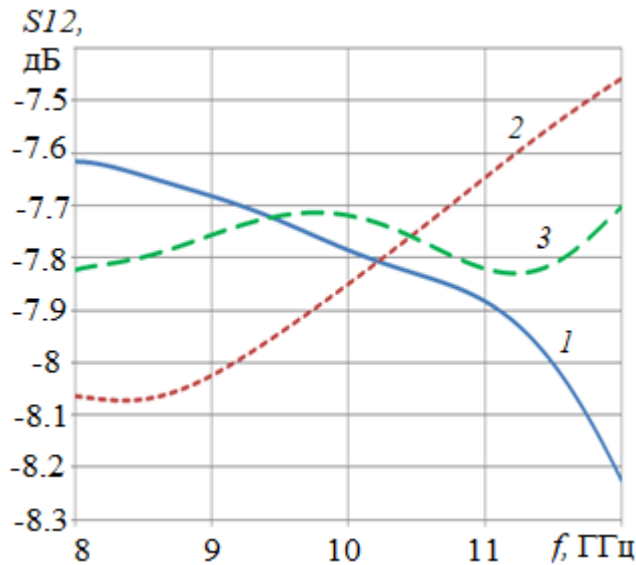


Рис.22. Коэффициенты передачи делителя 2.

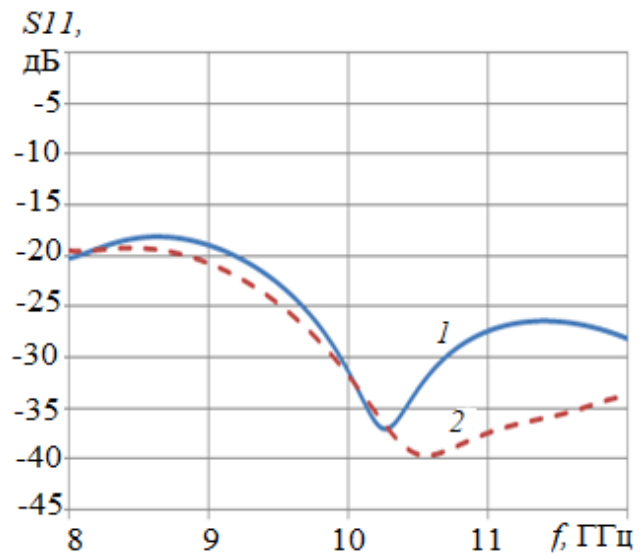


Рис.23. Коэффициенты отражения.

Как видно на рис. 20, неравномерность амплитудного распределения на выходах делителя резко растет с увеличением частоты. В нижней части диапазона (8 – 10.5 ГГц) разница лежит в пределах $\pm 0,2$ дБ.

Далее рассмотрим шестиканальный делитель 2 (рис.21). Соответствующая неравномерность мощности на выходах этого делителя наблюдается примерно в такой же полосе частот (8.8 -11.3 ГГц). Однако следует учесть, что коэффициент отражения делителей в нижней части диапазона существенно выше (рис.23).

На рис.24 показаны зависимости фазы коэффициентов передачи делителей от частоты. Видно, что разность фаз на выходах для обоих делителей во всей полосе частот не превышает 10^0 . Таким образом, рабочая полоса частот шестиканального делителя мощности составляет 2.5 ГГц (25%).

На рис. 25 показан восьмиканальный делитель 1 с равномерным расположением волноводных выходов по дуге раскрыва, а на рис.26 – зависимости его коэффициентов передачи от частоты. Как и в случае шестиканального делителя, неравномерность распределения мощности растет с увеличением частоты. Второй вариант делителя показан на рис.27.

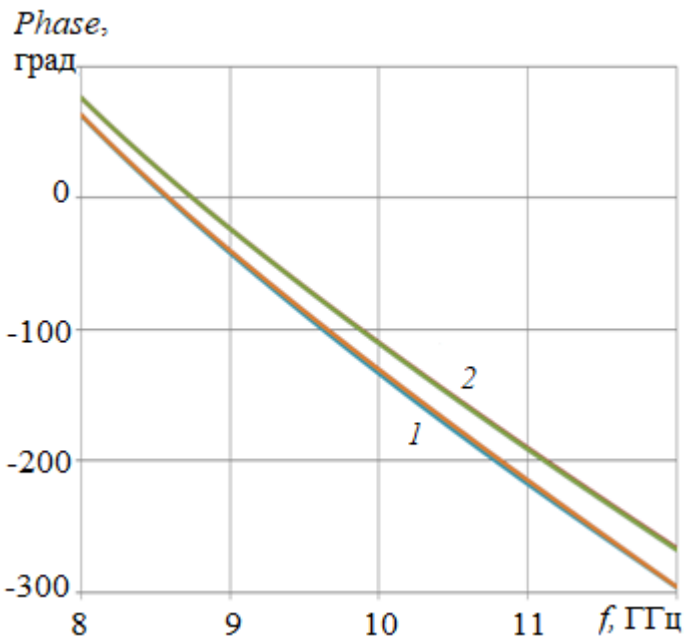


Рис.24. Фазы коэффициентов передачи.

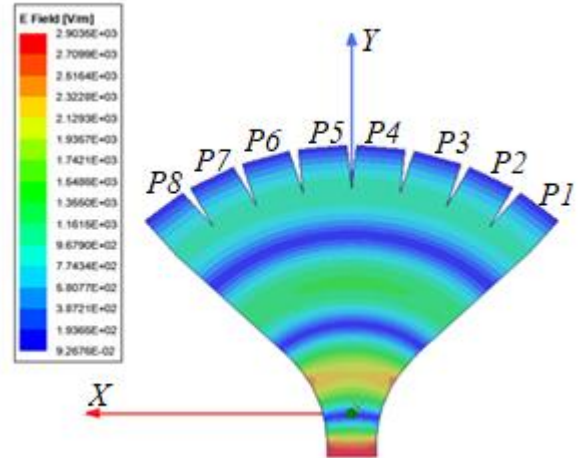


Рис.25 . Восьмиканальный делитель 1.

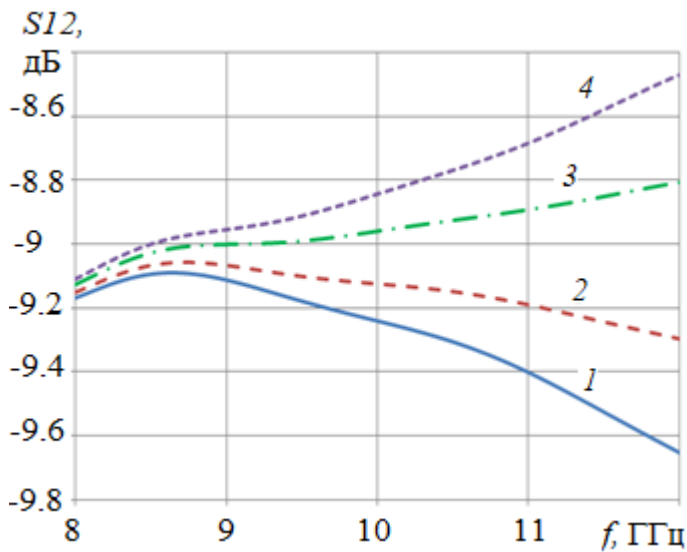


Рис.26. Коэффициенты передачи делителя 1.

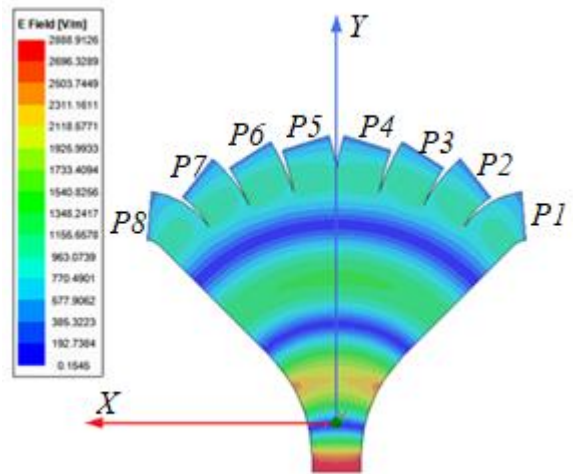


Рис.27. Восьмиканальный делитель 2.

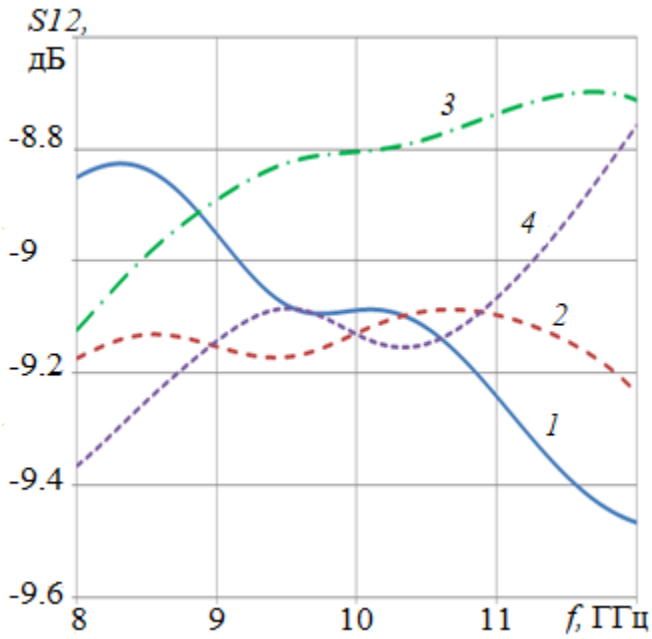


Рис.28. Коэффициенты передачи делителя 2.

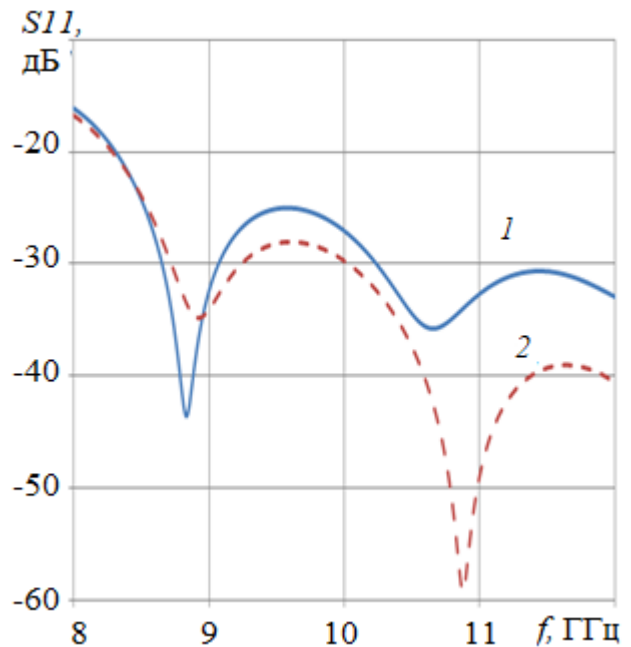


Рис.29. Коэффициенты отражения.

На рис.28 показаны частотные зависимости модулей коэффициентов передачи делителя 2, а на рис.29 – коэффициентов отражения обоих вариантов делителя. На рисунках видно, что неравномерность распределения мощности $\pm 0,2$ дБ на выходах делителя 1 наблюдается в полосе частот 8 – 10.2 ГГц, а делителя 2 в полосе - 8.5 – 10.7. Зависимости фазы коэффициентов передачи от частоты имеют такой же вид, как для шестиканальных делителей, поэтому мы их здесь не приводим.

Полосы частот делителей как по критерию неравномерности модуля коэффициента передачи, так и по уровню согласования - 20 дБ (8.5- 12 ГГц) примерно равны. Однако за счет сдвига полос по частоте рабочая полоса частот делителя 2 по критерию неравномерности модуля коэффициента передачи попадает в полосу согласования и, в результате, больше, чем у делителя 1. Таким образом, полоса рабочих частот восьмиканального делителя 2.2 ГГц (23%).

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее широкую полосу рабочих частот (38%) обеспечивает четырехканальный делитель мощности на основе плавного волноводного перехода.
2. Трехканальный делитель – ответвитель и многоканальные делители на основе E- секториального рупора обеспечивают примерно равные полосы частот (22 - 25%).
3. Частотные характеристики многоканальных делителей на основе линейных переходов с диэлектрической и металло-воздушной линзой характеризуются сильной изрезанностью, которую можно объяснить резонансами на запертых модах.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

Литература

1. Djerafi T., Wu K. Corrugated substrate integrated waveguide (SIW) antipodal linearly tapered slot antenna array fed by quasi-triangular power divider // Progress in Electromagnetics Research C. 2012. Vol. 26. P. 139–151.
2. Gupta S., Sebak A.R., Devabhaktuni V.K. Design of Ridge Gap Waveguide Power Divider for Reduced-sidelobe 60 GHz Applications // 2017 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC). 2017. P. 302 - 305.
3. Datta S., Mukherjee S., Biswas A. Design of Broadband Power Divider based on Substrate-Integrated Waveguide Technology // IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC). Bhubaneswar, India. Dec.2013.

4. Bouchra R., Amina A. Development of Ku Compact Broadband 1x4, 1x8 and 1x16 Power Dividers with SIW Optimized Chamfered Bends // Electrical and Electronic Engineering. 2019. Vol.9. No.1. P. 17-26.
5. Mohammed A.M., Wang Y. Four-way Waveguide Power Dividers with Integrated Filtering Function // Proceedings of the 45th European Microwave Conference. Paris. 7-10 Sept. 2015. P. 486.
6. Hesari S.S., Bornemann J. Antipodal Vivaldi Antenna Arrays Fed by Substrate Integrated Waveguide Right-Angled Power Dividers // Appl. Sci. 2018. No. 8. P. 2625. Available at: www.mdpi.com/journal/applsci.
7. Southworth G.C. Principles and Applications of Waveguide Transmission // D. Van Nostrand Company, 1950.
8. Ding J.-Y., Wu L., Shen W., Sun X.-W. E-Plane Five-Port Two-Way Waveguide Power Divider. Combiner with High Amplitude and Phase Consistency // Progress in Electromagnetics Research Letters. 2017. Vol. 66. P. 113–119.
9. Яцко Э.И., Щукина Т.А. Многоканальный волноводный делитель мощности // Авторское свидетельство СССР SU 1394283 А1. Опубликовано 07.05.88. Бюл. №17.
10. Калошин В.А., Нгуен К.Т. Широкополосные волноводные переходы в Е-плоскости. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may20/13/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.5.13.

Для цитирования:

Калошин В.А., Нгуен К.Т. Многоканальные волноводные делители в Е-плоскости. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun20/9/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.6.9.