

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ДИПОЛЬНО-ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА

ШИРОКОСМУГОВА ДИПОЛЬНО-ЩІЛИННА АНТЕНА

WIDE-BAND DIPOLE-SLOT ANTENNA

Аннотация. Рассмотрены свойства антенны в виде решетки параллельных щелей, прорезанных в плоском хорошо проводящем экране, возбуждаемых симметричным полуволновым вибратором. Путем компьютерного моделирования рассчитаны и на этой основе проанализированы частотные зависимости входного импеданса, коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента стоячей волны (КСВ). Результаты исследований наглядно отображают достоинства таких антенн.

Анотація. Розглянуто властивості антени у вигляді решітки паралельних щілин, прорізаних в плоскому добре провідному екрані, збуджуваних симетричним напівхвильовим вібратором. Шляхом комп'ютерного моделювання розраховані й проаналізовані частотні залежності вхідного імпедансу, коефіцієнта спрямованої дії (КСД) та коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ). Результати досліджень наочно відображають достоїнства таких антен.

Summary. Properties of the antenna in the form of parallel slots array cut in the flat well-conducting screen excited by symmetrical half-wave dipole are considered. On the basis of computer modeling frequency dependences of antenna input impedance, directivity and the VSWR are designed and analyzed. Results of researches evidently display advantages of such antenna.

Решение проблемы построения новых конструкций антенн, исследование их характеристик жизненно необходимо в процессе все более ускоряющегося развития радиоэлектронных средств различного назначения. Так развитие беспроводных технологий и общее стремление к миниатюризации радиоэлектронных устройств определяют научный, практический интерес и актуальность возможного применения малоразмерных широкополосных элементов.

Антенные элементы в виде щелей, прорезанных в тонком хорошо проводящем экране, или в стенках металлических волноводов были предложены и исследованы рядом авторов [1,2] достаточно давно и описаны во многих монографиях, например в [3].

Однако до настоящего времени не изучены разновидности антенных элементов в виде системы пассивных щелей, возбуждаемых диполями – их основные характеристики такие, как частотные зависимости входного импеданса, коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента стоячей волны (КСВ) на входе, направленные свойства.

Целью настоящей статьи является компьютерное моделирование указанных характеристик антенны, состоящей из решетки пассивных щелей, прорезанных в хорошо проводящем плоском экране и симметричного вибратора и сравнение их с аналогичными характеристиками обычного полуволнового диполя.

1. Геометрия исследуемых антенных элементов. Во всех рассмотренных далее вариантах каждый излучатель представляет собой сочетание эквидистантной антенной решетки, состоящей из n прямоугольных параллельных щелей ($n = 2 \dots 8$) со скругленными краями, прорезанных в металлическом круговом экране, и симметричного полуволнового вибратора, расположенного параллельно поверхности экрана на высоте $h \cong 0,04\lambda_0$, возбуждаемого в центре (длина волны λ_0 соответствует частоте 3 ГГц). Для удобства далее будем называть такой излучатель дипольно-щелевой антенной (ДЩА).

Число щелей в нем четное, прорезаны они в плоском круговом экране радиусом $R = 0,35\lambda_0$. Ширина всех щелей одинакова ($t = 0,04\lambda_0$), края их скруглены, расположены они попарно симметрично относительно центра экрана, а расстояние d между центрами щелей примерно равно $t + 0,02\lambda_0$. Длина всех щелей, начиная от центра, постепенно уменьшается от l_{\max} до l_{\min} .

Симметричный плоский вибратор длиной $l_d = 0,9(\lambda_0 / 2)$ (полуволновый диполь) и шириной $t_d = 7,5$ мм ориентирован продольной осью перпендикулярно продольным осям щелей. При этом поле, излучаемое этим вибратором, в той или иной мере возбуждает каждую из щелей и наводит

токи в поверхности в самого экрана. Для снижения влияния торцевых емкостей края вибратора скруглены, а вблизи источника возбуждения его поперечный размер постепенно уменьшается до 0,5 мм. Все элементы рассматриваемых далее моделей ДЩА обладают свойствами хорошо проводящего материала ($\sigma = 10^7$ С/м) с толщиной 0,5 мм.

На рис. 1 примерно (для удобства рассмотрения соотношение размеров элементов не сохранено) изображена геометрическая конфигурация одного из конструктивных вариантов ДЩА.

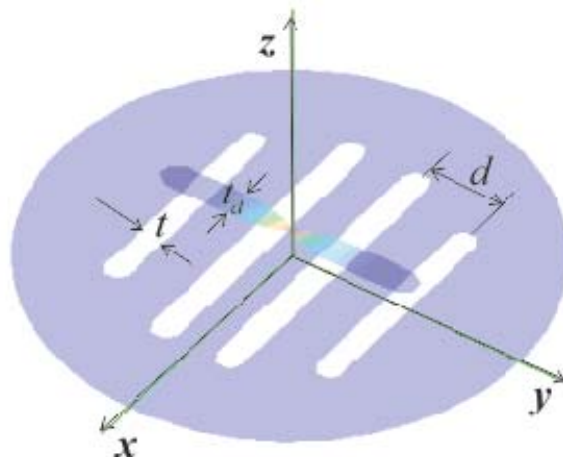


Рисунок 1 – Взаимное расположение диполя и решетки щелей

2. Методика исследования. В процессе компьютерного моделирования в среде программного комплекса FEKO [3] исследовались характеристики моделей дипольно-щелевых антенн с разным числом щелей. В расчетном модуле комплекса FEKO для решения таких задач используется метод моментов, согласно которому поверхности разбиваются на элементарные площадки, имеющие треугольную форму. Чем меньше размер такой площадки, тем выше точность этого метода.

В результате применения метода моментов составляется система линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов, которые имеют смысл амплитуд токов, текущих в пределах элементарной площадки, решение такой системы осуществляется известным методом Гаусса.

Приемлемая точность при определении амплитудно-фазового распределения токов на таких элементах достигается, если размер стороны треугольных элементов не превышает $\lambda/10$, где λ – длина волны в свободном пространстве, что впоследствии позволяет достаточно корректно рассчитать требуемые характеристики антенн в заданной полосе частот.

В приводимых ниже результатах компьютерного моделирования частота возбуждения симметричного вибратора варьировалась в пределах от 600 до 9000 МГц с интервалом 30 МГц. При этом размер стороны треугольников выбран равным $\lambda_0/30$, что обеспечило приемлемую точность даже на максимальной частоте.

3. Результаты численного моделирования. Частотные зависимости электродинамических характеристик исследуемых моделей излучателей показаны на приведенных ниже рисунках, цифры здесь обозначают их принадлежность таким вариантам конфигурации антенных элементов:

- 1 – диполь в свободном пространстве;
- 2 – одиночная щель в экране;
- 3 – диполь + экран без щелей;
- 4 – однощелевая ДЩА;
- 5 – двухщелевая ДЩА;
- 6 – четырехщелевая ДЩА;
- 7 – шестищелевая ДЩА;
- 8 – восьмищелевая ДЩА.

Рассмотрим вначале частотные зависимости входного импеданса (рис. 2...4). Здесь характерной особенностью является положение резонансных областей ($\text{Im } Z \cong 0$).

В частотных зависимостях входного импеданса, щелевого и дипольного излучателей имеет место чередование частот «последовательного» и «параллельного» резонансов. Минимальной для диполя является частота «последовательного» резонанса, а для щели – «параллельного» (рис. 2), при этом экстремальные значения действительной части входного импеданса $\mathbf{Re} Z(f)$ в области «параллельного» резонанса не превышают 400...500 Ом, а максимумы $\mathbf{Im} Z(f)$ меньше 150...200 Ом.

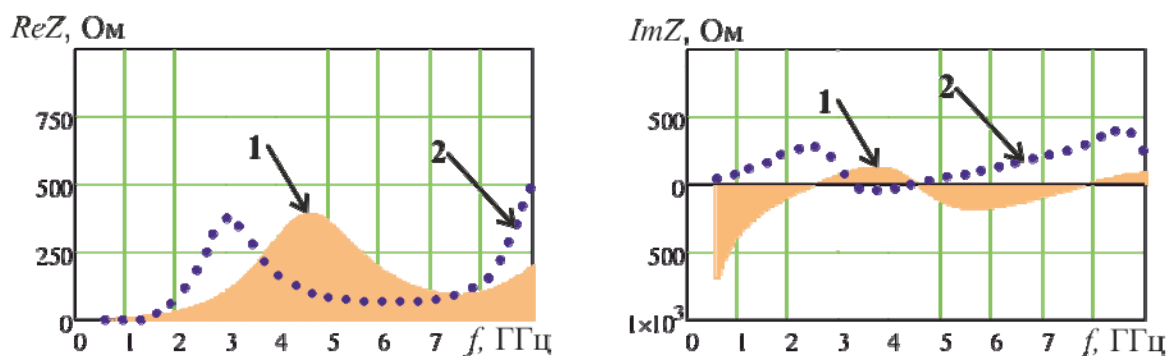


Рисунок 2 – Входной импеданс щелевого и дипольного излучателей: 1 – диполь в свободном пространстве; 2 – одиночная щель в экране

Влияние близкорасположенного экрана на характер изменения импеданса диполя можно оценить по графикам рис. 3. Нетрудно отметить, что наличие экрана в этом случае приводит к смещению резонансных областей в сторону более высоких частот.

Отметим, что максимальные значения $\mathbf{Re} Z$ и $\mathbf{Im} Z$ для элемента диполь-экран резко возросли по сравнению с отдельно взятым диполем и достигают значений 1700 и 900 Ом соответственно.

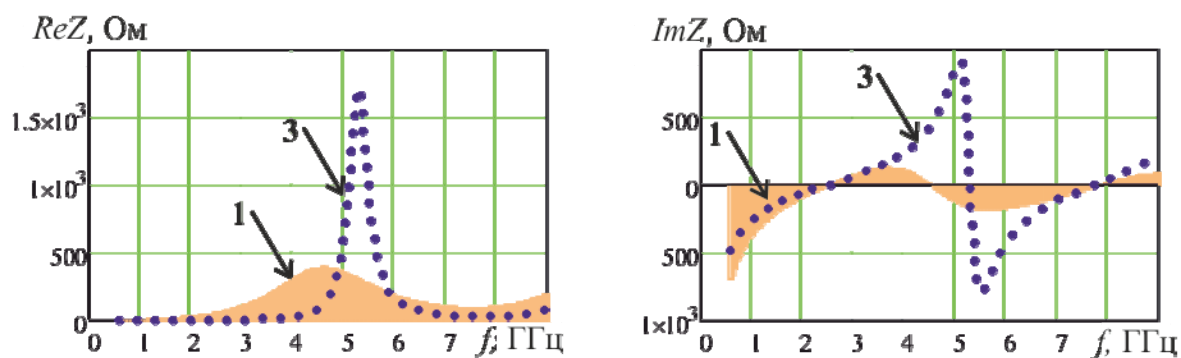


Рисунок 3 – Входной импеданс дипольного излучателя: 3 – диполь с экраном

Графические изображения, приведенные на рис. 2 и 3, дают возможность провести их сравнение с характеристиками рассматриваемых далее дипольно-щелевых антенных элементов с разным числом щелей.

Так, например, на рис. 4 приведены зависимости входного импеданса от частоты для дипольно-щелевого элемента с одной щелью.

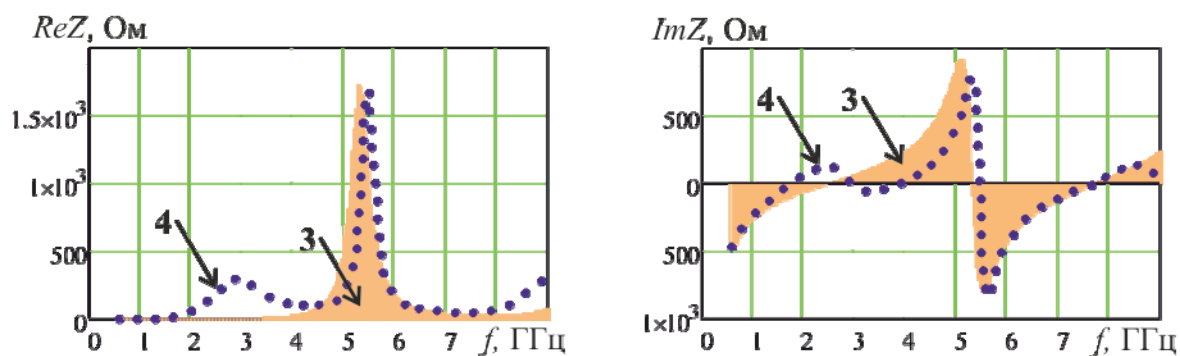


Рисунок 4 – Входной импеданс дискретно-щелевых антенн: 4 – однощелевая ДЩА

Видно, что взаимное влияние диполя и щели в экране привело к появлению в частотной зависимости входного импеданса новых резонансных частот: 1,85 и 4 ГГц («последовательный резонанс») и 3 ГГц («параллельный» резонанс) с локальным максимумом $\text{Re } Z \cong 300 \text{ Ом}$.

Увеличение количества щелей в экране (рис. 5...8) приводит к радикальным изменениям в частотной характеристике входного импеданса.

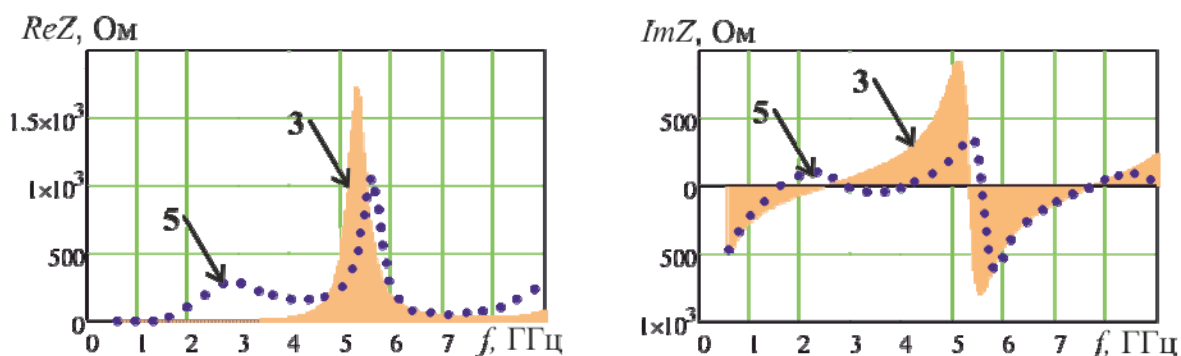


Рисунок 5 – Входной импеданс дискретно-щелевых антенн: 5 – двухщелевая ДЩА

С увеличением количества щелей происходит дальнейшее уменьшение экстремальных значений импеданса, что приводит к «сглаживанию» его частотной зависимости.

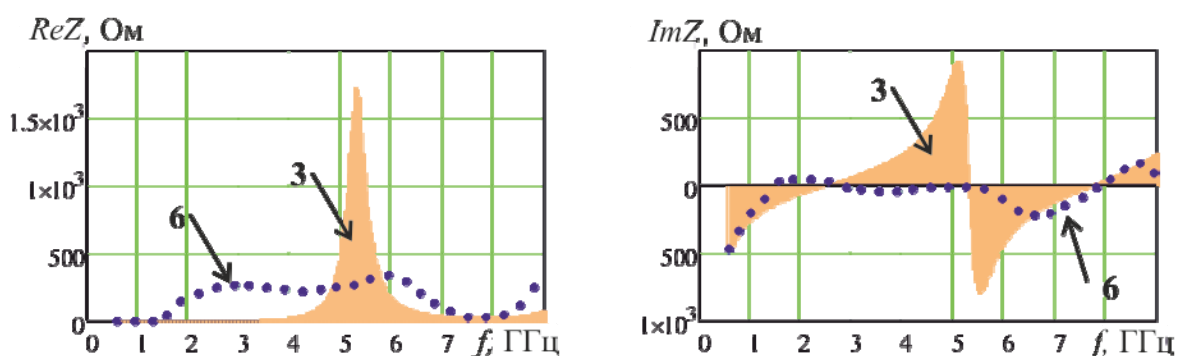


Рисунок 6 – Входной импеданс дискретно-щелевых антенн: 6 – четырехщелевая ДЩА

В результате для 6- или 8-щелевой конструкции антенного элемента диапазон частот, в котором $\text{Re } Z(f)$ находится в пределах 250...280 Ом, а значение $\text{Im } Z(f)$ близко к нулю простирается примерно от 2 до 9 ГГц. Такие результаты достигаются в том случае, если длину щелей плавно уменьшать по мере удаления их от центра.

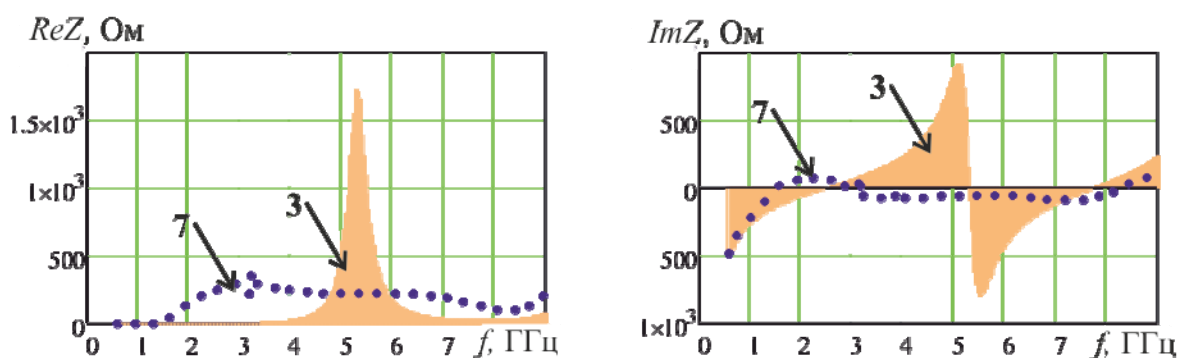


Рисунок 7 – Входной импеданс дискретно-щелевых антенн: 7 – шестищелевая ДЩА

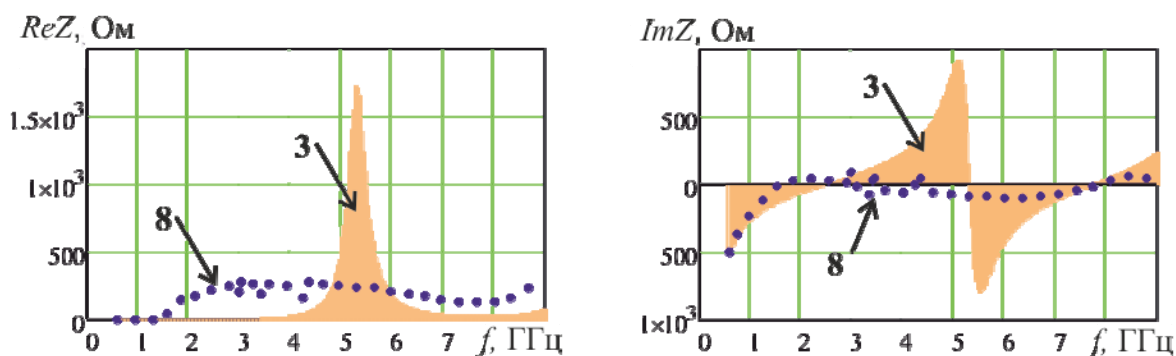


Рисунок 8 – Входной импеданс дискретно-щелевых антенн: 8 – восьмищелевая ДЩА

Очевидно, что такой характер поведения входного импеданса приведет к аналогичному расширению диапазона рабочих частот $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$ в области первого резонанса. На этот факт указывают и зависимости КСВ от частоты, приведенные на рис. 9...11. Эти зависимости построены для случая, когда сопротивление нагрузки было чисто активным и равным 250... 280 Ом (в зависимости от числа щелей). Для сравнения приводятся аналогичные зависимости для симметричного вибратора (отмечена цифрой 1) и одиночной щели (отмечена цифрой 2). Сравнивая графики, изображенные на рис. 9 и 10, можно отметить, что наличие близкорасположенного экрана резко сужает полосу частот в области резонанса. Эту ситуацию мало меняет наличие одной щели в экране, однако уже при двух симметрично расположенных щелях эта полоса заметно расширяется: незначительно в низкочастотную область и существенно в область высших частот. Увеличение количества щелей в экране (рис. 10 и 11), при соответствующем постепенном уменьшении их длины, позволяет добиться того, что верхняя граница рабочей полосы даже выходит за пределы рассматриваемого частотного диапазона.

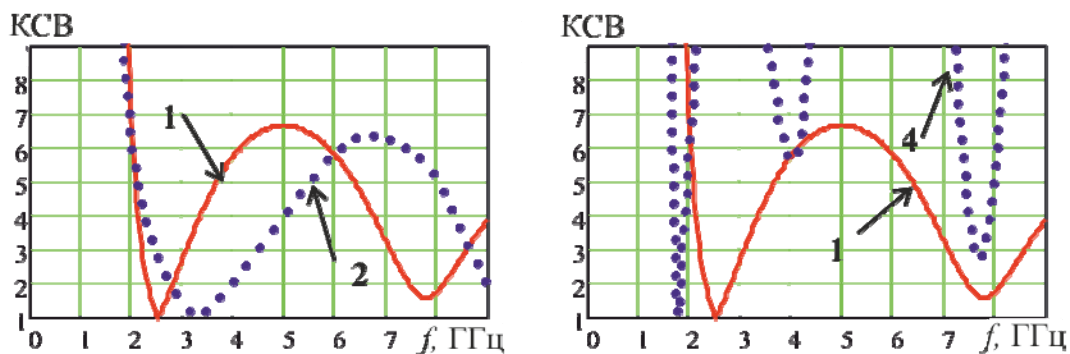


Рисунок 9 – Частотные зависимости КСВ дискретно-щелевой антенны: 4 – однощелевая антенна

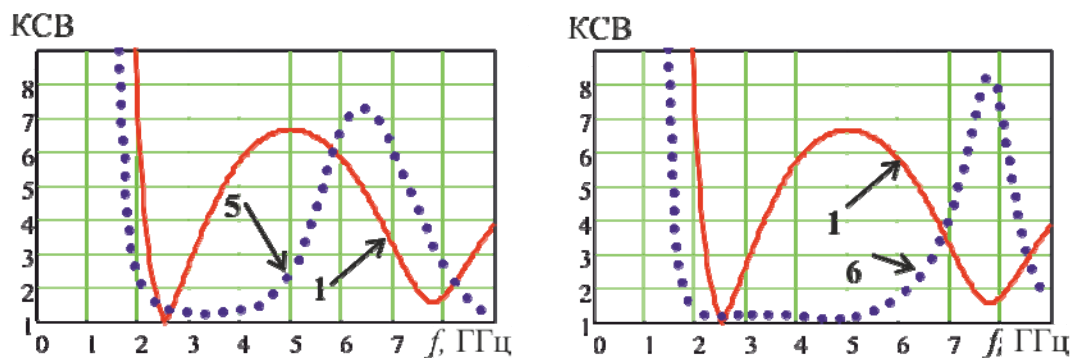


Рисунок 10 – Частотные зависимости КСВ дискретно-щелевых антенн:
5 – двухщелевая антенна, 6 – четырехщелевая антенна

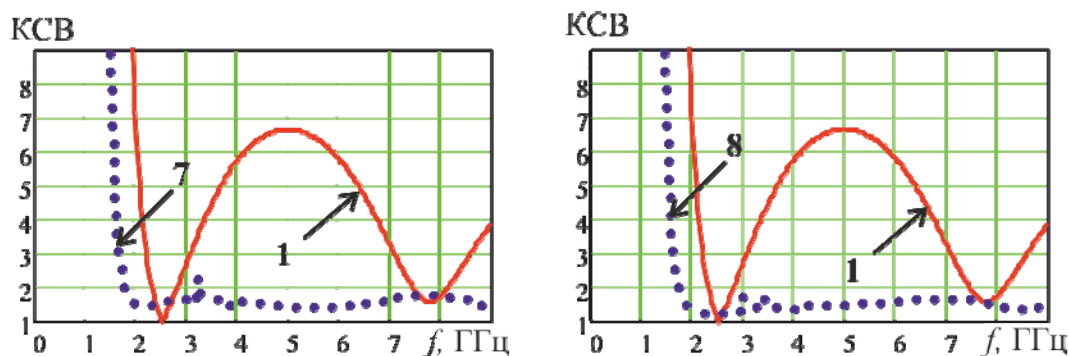


Рисунок 11 – Частотные зависимости КСВ дискретно-щелевых антенн:
7 – шестищелевая антенна; 8 – восьмищелевая антенна

На рис. 11 также видны слабые резонансные явления в районе 3...4 ГГц. Можно предположить, что путем оптимизации таких параметров, как количество щелей в экране, их ширина и расстояние между ними, закон изменения длины щелей, можно устранить эти эффекты и еще более расширить рабочую полосу частот.

В табл. 1 приведены численные данные, характеризующие степень изменения рабочей полосы частот для различных вариантов конфигурации дипольно-щелевой антенны.

Таблица 1 – Полоса рабочих частот при $КСВ \leq 2$.

Тип излучателя	Число щелей, n	Δf , ГГц	l_{\max}	l_{\min}
Щель в экране	1	1,2	$0,85 \lambda_0$	-
Диполь	-	0,51	$0,9 \lambda_0 / 2$	-
Диполь + экран	-	0,015	$0,9 \lambda_0 / 2$	-
Дипольно-щелевая антенна	1	0,06	$0,85 \lambda_0 / 2$	-
	2	1,7	$0,85 \lambda_0 / 2$	-
	4	4,4	$0,85 \lambda_0 / 2$	$0,9 l_{\max}$
	6	7,2	$0,85 \lambda_0 / 2$	$0,7 l_{\max}$
	8	7,3	$0,85 \lambda_0 / 2$	$0,6 l_{\max}$

Исходя из данных, приведенных в таблице и на рис. 11, можно предполагать, что для шести- и восьмищелевых ДЩА верхняя граница частотного диапазона находится примерно в районе 10-12 ГГц.

Об изменении направленных свойств ДЩА можно судить, рассматривая графики, изображенные на рис. 12. На них отображена частотная зависимость КНД в направлении нормали к плоскости экрана ($\theta = 0^\circ$).

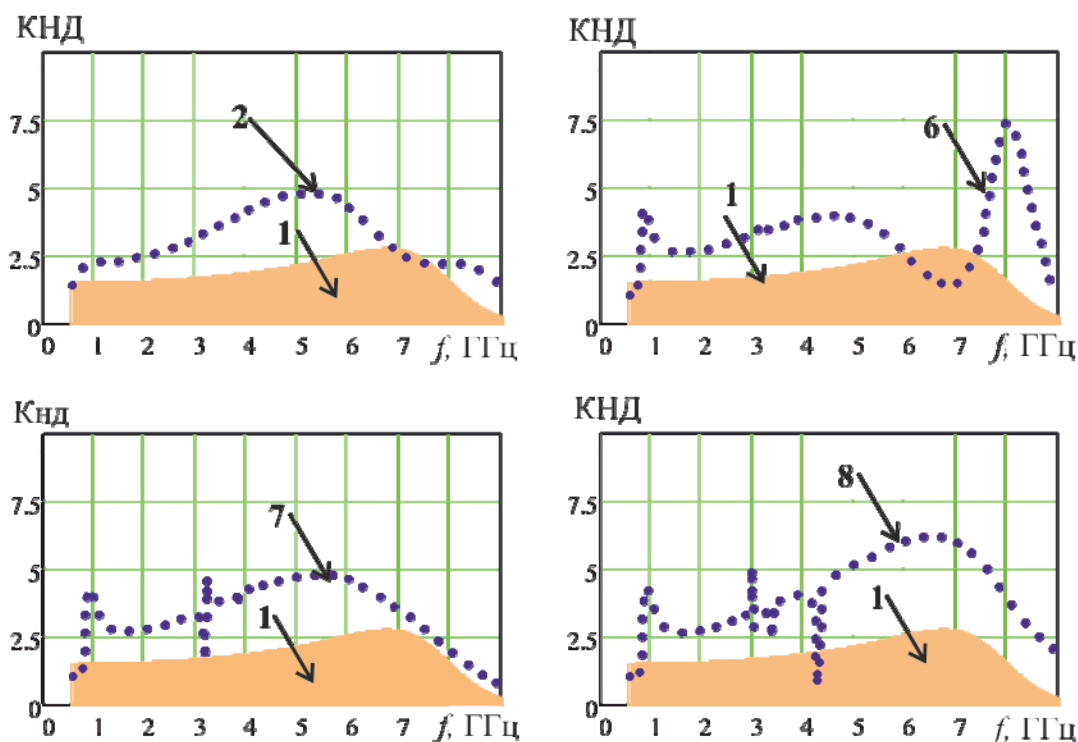


Рисунок 12 – Частотные зависимости КНД дискретно-щелевых антенн

Отметим, что максимум КНД ДЩА имеет место именно в направлениях нормалей к плоскости экрана ($\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$), тогда как в плоскости самого экрана ($\theta = 90^\circ$) КНД минимален. В случае шести- и восьмищелевых антенн можно заметить упомянутые ранее резонансные эффекты и связанные с ними «скачки» и «провалы» в главном лепестке диаграмм направленности на частотах в районе 3... 4 ГГц.

Сделать выводы о преимуществах и свойствах различных конструкций ДЩА, помогает сравнение их характеристик между собой и с аналогичными характеристиками линейного симметричного вибратора и щелевого излучателя геометрические параметры которых аналогичны параметрам отдельно взятых элементов ДЩА.

Особенностями рассмотренных конструкций ДЩА является относительно малое расстояние между возбуждающим диполем и щелевой решеткой. Кроме того отличительным свойством рассматриваемых антенн является то, что ширина щелей соизмерима с расстоянием между соседними щелями, а длина щелевых элементов решетке уменьшается от середины к краям. Особый интерес представляет существенное расширение рабочего диапазона частот, в пределах которого мнимая часть входного импеданса вибратора ДЩА мала и $KCB < 2$. Такая особенность, по всей вероятности, обусловлена одновременным влиянием нескольких причин:

- различиями закономерностей изменения входного импеданса диполя и щелей при вариации частоты;
- наличием сильной взаимной связи между вибратором и щелями, а также между самими щелевыми элементами;
- особенностями конструкции ДЩА, в которой длина каждой щели уменьшается по мере увеличения расстояния от центра экрана;
- перераспределением амплитуды и фазы тока на вибраторе при изменении частоты;

- резонансными явлениями в распределении токов на поверхности экрана вблизи концевых участков щелей.

В заключение отметим, что в данной статье приведены результаты компьютерного моделирования электродинамических характеристик дипольно-щелевых антенн, выполненных в виде плоского симметричного вибратора и эквидистантной решетки близкорасположенных прямоугольных щелей, прорезанных в плоском круговом хорошо проводящем экране.

Основываясь на полученных результатах можно указать возможные направления дальнейших исследований, например, оптимизацию геометрических параметров ДЩА с целью еще большего расширения полосы рабочих частот по сравнению одиночными щелевыми и дипольными излучателями, а также усовершенствование конструкций для получения широкополосного однонаправленного излучения.

Литература

1. *Watson W. H.* Resonant slots / *W. H. Watson* // *IEE Jour. (London)*. – 1946. – Vol. 93, Part IIIA. – № 4, 1946. – P. 747–777.
2. *Stevenson A. E.* Theory of a slots in rectangular waveguides / *A. E. Stevenson* // *Jour. Appl. Phys.* - 1948. – Vol. 19, January, – P. 24–38.
3. *Balanis C.A.* Modern antenna handbook / *Balanis C.A.* – John Wiley & Sons, Canada, 2008. – P. 1680.
4. *Банков С.Е.* Расчет излучаемых структур с помощью FEKO / *С.Е. Банков, А.А. Курушин*. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.