

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОЙ РЕШЕТКИ С ШИРОКИМ СЕКТОРОМ ЧАСТОТНОГО СКАНИРОВАНИЯ

В. А. Калошин, В. И. Калиничев

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 30 января 2019 г.

Аннотация. Исследованы характеристики излучения линейной волноводно-щелевой антенной решетки с широким сектором частотного сканирования. Широкий сектор сканирования решетки достигается благодаря непрерывному по частоте переходу из режима излучения основной (нулевой) гармоники в режим излучения -1 гармоники пространственного спектра. Показано, что из-за неравномерности постоянной затухания вытекающей моды в полосе частот рабочего диапазона и высокого уровня отражения в области перехода от одного режима излучения к другому антенная решетка характеризуется сильной неравномерностью частотной характеристики коэффициентов усиления и использования апертуры.

Ключевые слова: волноводно-щелевая антенная решетка, частотное сканирование, коэффициент отражения, коэффициент усиления, коэффициент использования поверхности.

Abstract. A linear slotted waveguide antenna array with a wide frequency scanning sector and its electromagnetic model were proposed in [1]. The antenna array is made of a rectangular metal waveguide filled with a dielectric and loaded by periodically located pairs of transverse slots in a wide wall. A wide scanning sector is achieved due to the continuous frequency transition from the fundamental (zero) harmonic radiation mode to the -1 harmonic radiation mode of the array spatial spectrum. As a result of the numerical simulations the possibility of beam scanning in the 180-degree angular sector was shown and the frequency dependences of the normalized radiation patterns, directivity and the scattering matrix parameters were computed. In this paper, we study such radiation characteristics as the array gain and the aperture

efficiency. It is shown that due to the non-uniformity of the leakage constant in the operating frequency band and the high reflection level in the frequency transition region from one radiation mode to the other the antenna array is characterized by strong non-uniformity of the gain and the aperture efficiency versus frequency in most of the operating range.

Keywords: slotted waveguide antenna array, frequency scanning, reflection coefficient, gain, aperture efficiency.

В работе [1] была предложена линейная волноводно-щелевая антенная решетка с широким сектором частотного сканирования. Антенная решетка выполнена в виде заполненного диэлектриком прямоугольного металлического волновода вытекающей волны (ВВВ) с периодически расположенными парными поперечными щелями в широкой стенке. Широкий сектор сканирования обеспечивается непрерывным переходом по частоте между режимом излучения основной (нулевой) и -1 гармонике пространственного спектра в диапазоне рабочих частот антенны, определяемым полосой одномодового режима волновода. С использованием метода конечных элементов (МКЭ) в [1] построена электродинамическая модель антенной решетки, и в результате численного моделирования показана возможность сканирования луча антенны в секторе углов до 180° . В работе найдены частотные зависимости нормированных диаграмм направленности, коэффициентов направленного действия (КНД) и матрицы рассеяния ВВВ, однако не исследованы такие важные характеристики излучения решетки как коэффициенты усиления (КУ) и использования поверхности (КИП) антенны, которые характеризуют эффективность ее излучения.

Цель данной работы – исследование указанных характеристик.

Исследуемая линейная волноводно-щелевая антенная решетка приведена на рис. 1. Прямоугольный волновод сечения $a \times b$ (a – размер широкой стенки) заполнен диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ . В верхней широкой стенке ВВВ прорезаны парные

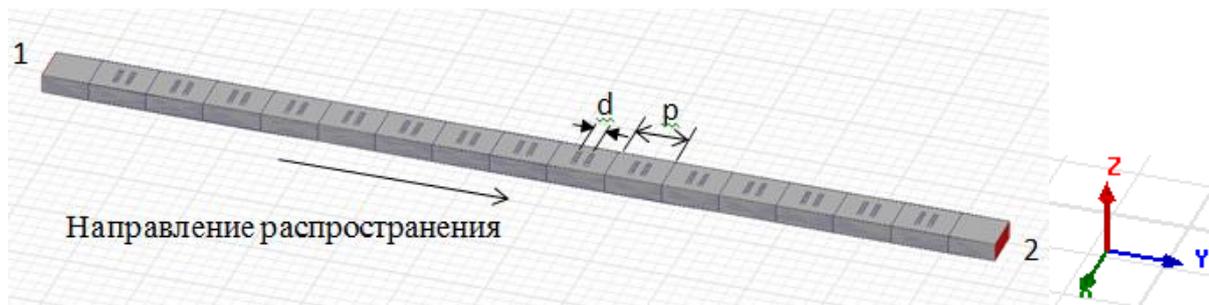


Рис. 1. Линейная волноводно-щелевая антенная решетка с парными поперечными щелями в широкой стенке

поперечные щели, расположенные вдоль волновода с периодом p и расстоянием d между щелями пары.

Предположим, что в ВВВ распространяется только одна мода (H_{10}), постоянная распространения которой в отсутствие щелей определяется выражением $\beta_0 = [(k^2 \varepsilon - (\pi/a)^2)^{1/2}]$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства, λ – длина волны на рабочей частоте f . Выбор параметров ВВВ описан в работе [1] и состоит в выборе периода решетки p и диэлектрической проницаемости ε . Период определяется из условия непрерывного перехода по частоте между режимами излучения основной и -1 гармоник пространственного спектра, а диэлектрическая проницаемость материала заполнения – из условия заданного угла излучения θ на верхней частоте рабочего диапазона, который должен совпадать с углом излучения основной гармоники на нижней частоте. Верхняя частота принята равной критической частоте ближайшей высшей моды (H_{20}).

Выберем те же параметры ВВВ, что и в работе [1]: $a = 13.92$ мм, $b = 6.05$ мм, диэлектрическая проницаемость материала заполнения $\varepsilon = 2.73$, величина которой соответствует углу излучения $\theta = 10^\circ$ на верхней частоте рабочего диапазона, тангенс диэлектрических потерь $tg\delta = 0.001$, стенки волновода бесконечно тонкие и идеально проводящие. Критическая частота этого волновода $f_c = 6.52$ ГГц, верхняя частота рабочего диапазона равна $2f_c = 13.04$ ГГц. Период расположения щелей $p = a(\varepsilon - 1)^{1/2} = 18.3$ мм. Частота перехода, на которой прекращается излучение 0 гармоники и возникает излучение -1

гармоники, $f_l = f_c[\varepsilon/(\varepsilon-1)]^{1/2} = 8.19$ ГГц. Расстояние между центрами щелей в каждой паре $d=4$ мм, что равно примерно четверти длины моды H_{10} на частоте излучения по нормали $f_n = f_c[(\varepsilon+3)/(\varepsilon-1)]^{1/2} = 11.87$ ГГц. Длина апертуры $L=274.5$ мм, щелей - 7 мм, ширина щелей - 1.5 мм, число периодов - 15.

На рис. 2 сплошной и штриховой кривыми, соответственно, показаны рассчитанные с использованием МКЭ частотные зависимости КУ и КНД решетки, а пунктирной кривой - величина $KU_a = 4\pi S/\lambda^2$ - КУ апертуры площадью $S = axL = 13.92 \times 274.5$ мм² с равномерным амплитудно-фазовым распределением в рассмотренном диапазоне частот.

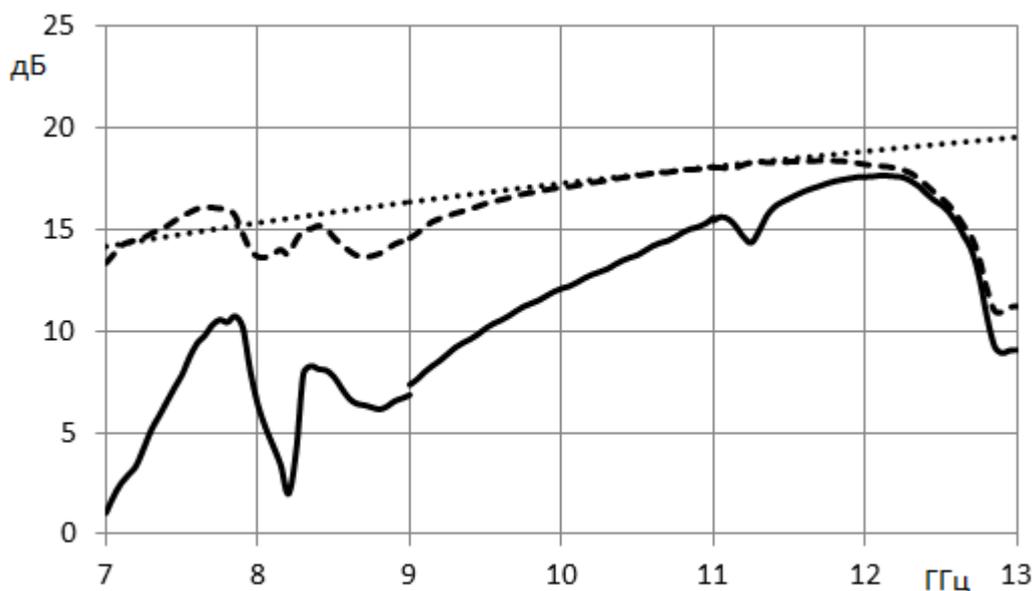


Рис. 2. Частотные зависимости КУ (сплошная линия), КНД (штриховая линия) и КУ_а (пунктирная линия)

На рис. 3 сплошной, штриховой и пунктирной линиями приведены, соответственно, частотные зависимости величины КИП, коэффициента прохождения (S_{21}) и отражения (S_{11}). На рисунках 2, 3 видно, что величины КУ и КИП решетки в большей части частотного диапазона сильно меняются, причем КИП в большей части диапазона рабочих частот составляет менее 0.6 и превосходит это значение только в интервале частот от 11.4 ГГц до 12.4 ГГц. На рис. 3 видно, что максимальное значение КИП = 0.75 (-1.25 дБ) достигается

на частоте 12 ГГц. Величина постоянной затухания на этой частоте $\alpha \approx 2.23$ Нп/м, а параметр $t = \alpha L = 0.61$. В соответствии с графиком зависимости величины КИП от t для упрощенной модели антенны бегущей волны в [2] (рис. 1.4) значение КИП составляет примерно -2 дБ, то есть несколько меньше.

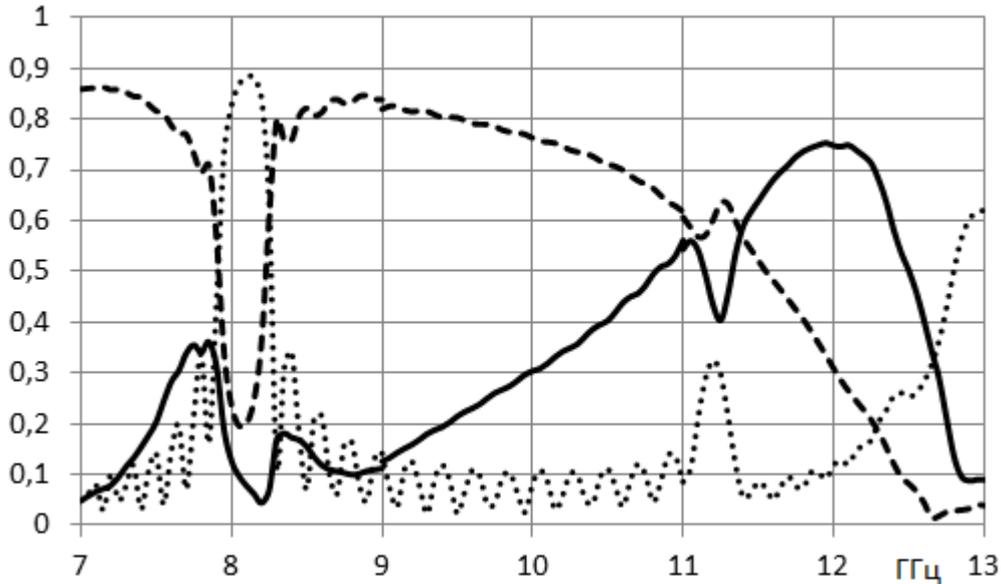


Рис. 3. Частотные зависимости КИП (сплошная линия), S_{21} (штриховая линия) и S_{11} (пунктирная линия)

Малые значения величины КИП в области нижних и средних частот диапазона можно объяснить недостаточно высокой скоростью вытекания моды ВВВ, что подтверждается большими значениями S_{21} . Резкое снижение величины КИП в окрестности 8 ГГц связано с резким возрастанием S_{11} из-за синфазного отражения от щелей. Локальное уменьшение величины КИП в окрестности 11.2 ГГц связано с не полностью скомпенсированным отражением при излучении по нормали. В области частот выше 12 ГГц уменьшение КИП вызвано неравномерным распределением амплитуды поля вдоль апертуры, о чем свидетельствуют малые значения S_{21} для этих частот. Неравномерность распределения поля в этой области частот может быть обусловлена возбуждением высшей моды в ВВВ и -2 гармоники в пространственном спектре поля излучения решетки. Кроме того, в этой области частот мы приближаемся к

резонансу щелей, что, как показано ниже, приводит к резкому увеличению постоянной затухания и, соответственно, неравномерности амплитудного распределения вытекающей моды вдоль ВВВ.

Для увеличения доли излученной мощности можно увеличить длину ВВВ. На рис. 4, 5 представлены частотные зависимости КНД, КУ и КИП для ВВВ длиной $L=549$ мм с 30-ю парами щелей. При этом КИП выше 0.6 достигается в диапазоне примерно от 10.5 до 12 ГГц.

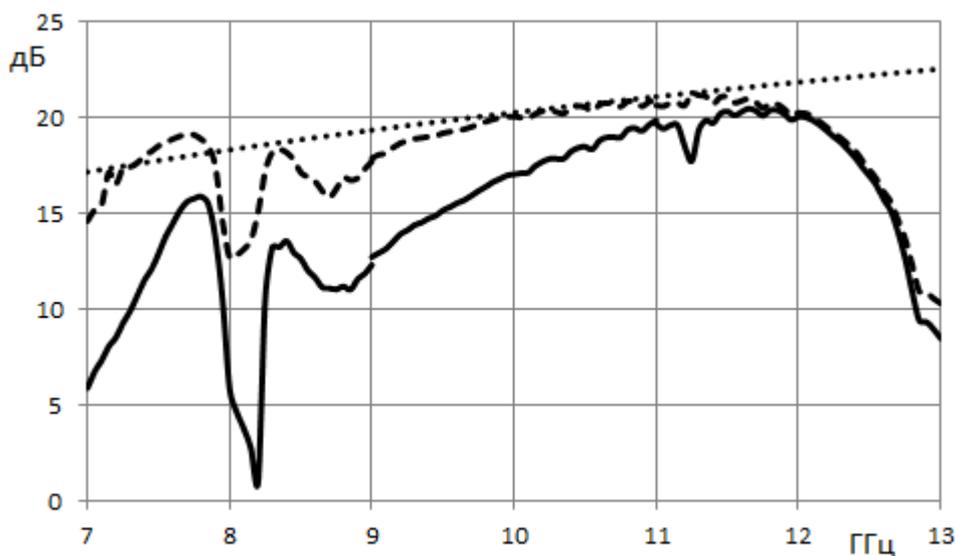


Рис. 4. Частотные зависимости КУ (сплошная линия), КНД (штриховая линия) и KU_a (пунктирная линия) для решетки с 30-ю периодами

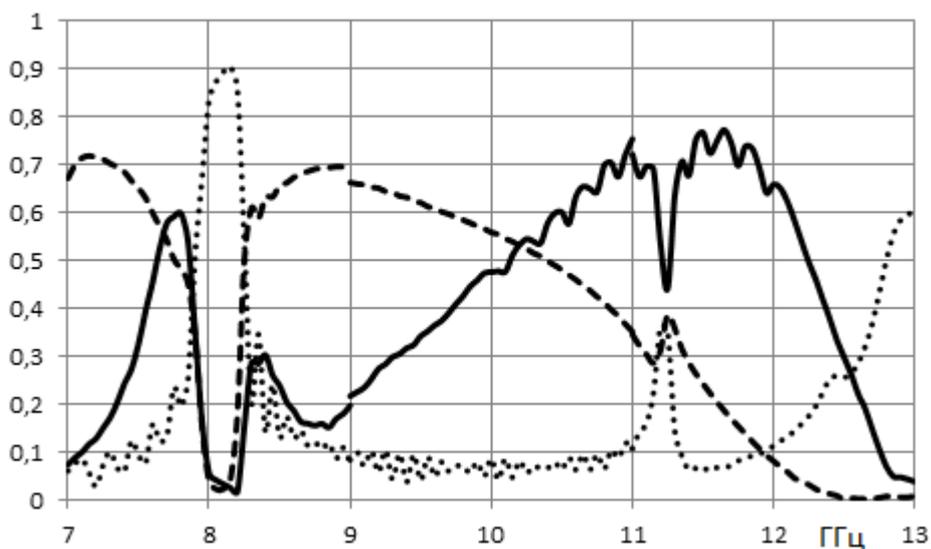


Рис. 5. Частотные зависимости КИП (сплошная линия), S_{21} (штриховая линия) и S_{11} (пунктирная линия) для решетки с 30-ю периодами

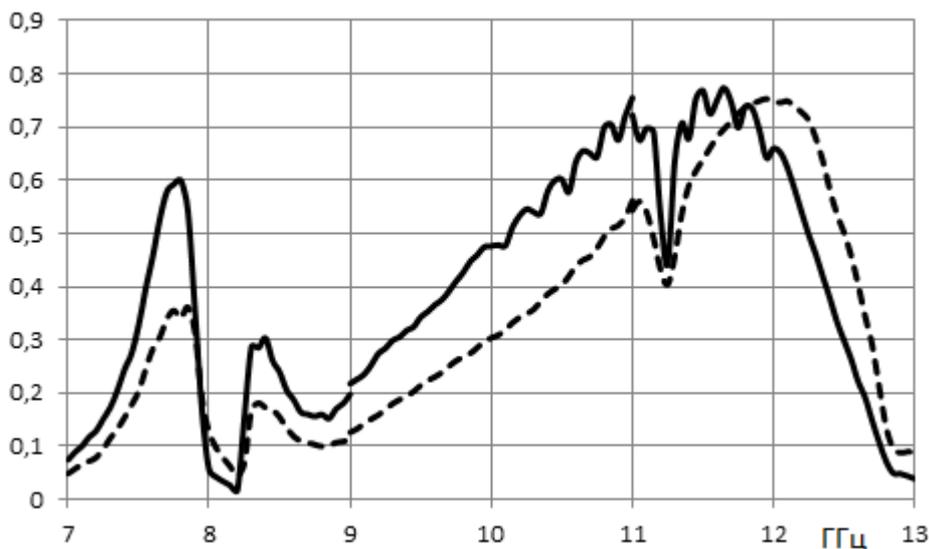


Рис. 6. Сравнение величин КИП решеток с 30-ю (сплошная линия) и 15-ю (штриховая линия) периодами

На рис. 6 приведено сравнение величин КИП для двух вариантов решетки. Как и следовало ожидать, для более длинной решетки величина КИП возрастает в средней части диапазона за счет большей излученной мощности и уменьшается в его верхней части за счет более неравномерного распределения амплитуды поля вдоль решетки.

Для ответа на вопрос о возможности улучшения характеристик исследуемой антенной решетки были проведены расчеты постоянной распространения и затухания моды ВВВ. Расчеты проводились с использованием МКЭ и резонаторной модели ВВВ [3], с длиной резонатора равной периоду ВВВ (рис.7) и периодическими граничными условиями в двух поперечных сечениях. Кроме того, в модели использовались поглощающие слои на боковых гранях воздушного бокса, окружающего рассматриваемый резонатор. Используя МКЭ, были рассчитаны собственные комплексные частоты эквивалентного резонатора, действительная часть которых определяет постоянную распространения соответствующей волноводной моды, мнимая часть – постоянную затухания.

Результаты расчетов постоянной распространения в диапазоне частот от 6.6 ГГц до 12.5 ГГц представлены на рис. 8 сплошной линией. Пунктирная

линия показывает постоянную распространения моды H_{10} в волноводе без щелей в том же диапазоне частот. Видно, что имеют место разрывы дисперсионной характеристики ВВВ, и в окрестности частот изменения режима излучения (≈ 8 ГГц) и излучения по нормали (≈ 11.2 ГГц) образуются зоны непропускания.

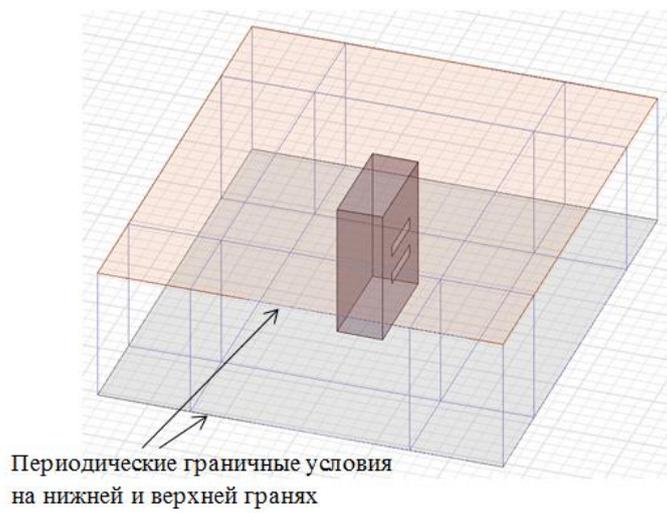


Рис. 7. Модель эквивалентного резонатора

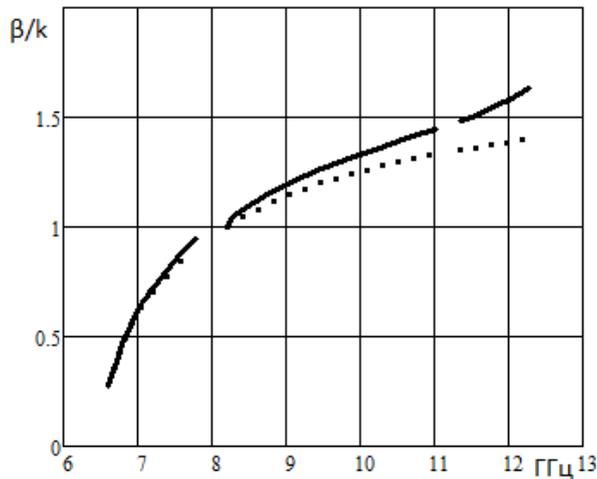


Рис. 8. Сплошная кривая – частотная зависимость постоянной распространения ВВВ, пунктирная – в волноводе без щелей

На рис. 9 приведена частотная зависимость угла излучения θ , отсчитываемого от нормали к решетке в Е-плоскости. Левая ветвь этой зависимости $0 < \theta < 90^\circ$ (в нижней части диапазона) соответствует режиму излучения основной гармоники, правая ветвь (для более высоких частот) –

режиму излучения -1 гармоники. В режиме излучения -1 гармоники на частотах $f < 11.2$ ГГц волновод излучает в диапазоне углов $-90^\circ < \theta < 0$ (назад относительно направления распространения), а на частотах $f > 11.2$ ГГц - в диапазоне углов $\theta > 0$ (вперед относительно направления распространения).

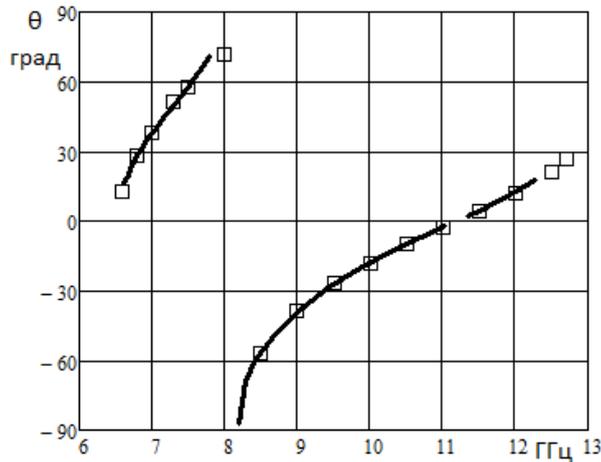


Рис. 9. Зависимость угла излучения от частоты. Сплошные линии – расчет на основе фазовой характеристики, точки – направления луча в задаче возбуждения конечной решетки

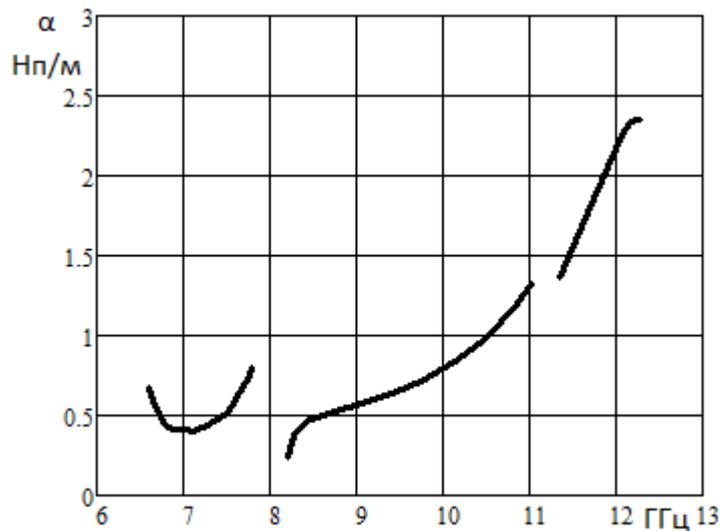


Рис. 10. Постоянная затухания ВВВ в зависимости от частоты

Частотная зависимость постоянной затухания приведена на рис.10. Она была рассчитана с помощью формулы [4]: $\alpha = 2\pi \text{Im}(f)/v_g$, где $v_g = 2\pi d[\text{Re}(f)]/d\beta$ – групповая скорость, β – фазовая постоянная распространения волны в

волноводе, $Re(f)$ – действительная часть собственной частоты, $Im(f)$ – ее мнимая часть. Для упрощения вычислений предполагается, что величина v_g для периодического волновода приближенно может быть рассчитана по той же формуле, что и для волновода без щелей $v_g \approx c_\varepsilon^2/v_p$, в которой $v_p = 2\pi Re(f)/\beta$ – фазовая скорость волны в волноводе, c_ε – скорость света в материале, заполняющем волновод. На рисунке видно, что эта величина сильно меняется с частотой, в частности, резко растет на высоких частотах.

В заключение отметим, что зоны непропускания в ВВВ конечной длины отсутствуют, а на соответствующих частотах наблюдается только локальное увеличение отражения. По-видимому, это отражение можно уменьшить путем усложнения геометрии щелей или использования дополнительных согласующих элементов.

Более сложная проблема заключается в выравнивании частотной зависимости постоянной затухания, без чего нельзя обеспечить высокую величину КИП антенной решетки в широкой полосе частот и, соответственно, широкий угол частотного сканирования.

Литература

1. В. А. Калошин, В. И. Калинин. Линейная волноводно-щелевая антенная решетка с 180- градусным сектором частотного сканирования. Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. №6. (в печати)
2. Банков С.Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит. 2013.
3. В. И. Калинин, А. А. Бабаскин. Метод расчета постоянной распространения вытекающей моды в волноводах со щелями. Журнал радиоэлектроники. 2015. №7. <http://jre.cplire.ru/jre/jul15/2/text.pdf>
4. Xu F., Patrovsky A., Wu K. Fast Simulation of Periodic Guided-Wave Structures Based on Commercial Software. Microwave Opt. Technol. Lett., 2007. Vol. 49. No. 9, pp. 2180-2182.

Для цитирования:

В. И. Калиничев, В. А. Калошин. Характеристики излучения линейной волноводно-щелевой решетки с широким сектором частотного сканирования. Журнал радиоэлектроники. [электронный журнал]. 2019. № 2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.2.7