

УДК 621.396.67

ОБ ИЗЛУЧЕНИИ МИКРОПОЛОСКОВЫХ РУПОРОВ

С. Е. Банков, Г. Г. Грачёв, В. А. Калошин
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
125009, Москва, Моховая, 11-7

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2017 г.

Аннотация. На основе интеграла Кирхгофа и приближения Олинера получены асимптотические формулы для излученного поля и диаграммы направленности микрополоскового рупора. С использованием полученной формулы проведены расчеты амплитудной и фазовой диаграммы направленности микрополосковых рупоров с различными углами раствора. Результаты расчетов сопоставлены с результатами, полученными с использованием метода конечных элементов и путем численного расчета интеграла Кирхгофа.

Ключевые слова: микрополосковый рупор, интеграл Кирхгофа, приближение Олинера, асимптотические формулы.

Abstract. On the basis of the Kirchhoff integral and the Oliner approximation the asymptotic formulas for a radiated field and a radiated pattern of a microstrip horn are received. The amplitude patterns and phase patterns of microstrip horns with various angles have been calculated with the use of the received formula. The results are compared with the ones obtained with the use of finite element method and numerical calculation of the Kirchhoff integral.

Key words: microstrip horn, Kirchhoff integral, Oliner approximation, asymptotic formulas.

Микрополосковые (МП) рупоры используются в качестве облучателей планарных линз и зеркал, в частности, линз Ротмана [1]. При этом для анализа характеристик излучения МП рупора обычно применяются численные методы. В работе [2] для анализа положения фазового центра МП рупора использовалось разложение поля излучения рупора в планарный волновод по

цилиндрическим модам. В данной работе исследуется возможность применения асимптотических методов для аналитического решения задачи об излучении МП рупора.

Для нахождения асимптотического решения задачи излучения МП рупора в планарный волновод необходимо знать распределение поля внутри рупора. Однако прежде чем рассматривать поле внутри МП рупора, рассмотрим поле в МП линии (МПЛ), которая переходит в МП рупор и затем в планарный волновод (ПВ), как это показано на рис.1.

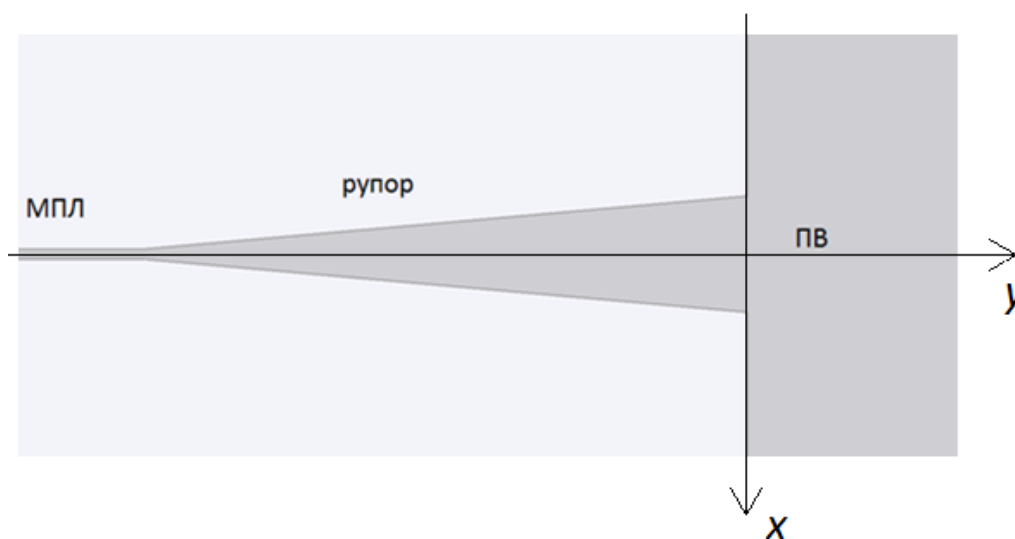


Рис. 1. Исследуемая структура

МПЛ содержит металлический полосок шириной w , расположенный над металлическим граундом. Между полоском и граундом находится диэлектрическая подложка толщиной h с относительной диэлектрической проницаемостью ε . Рупор излучает, главным образом, в ПВ, образованный подложкой между двумя граундами. При дальнейшем анализе будем полагать, что внутри МПЛ и ПВ распространяется только основная ТЕМ мода.

Ниже на рис. 2 приводится распределение компоненты поля E_z основной моды МПЛ вдоль поперечной координаты x в плоскости, параллельной граунду и расположенной посередине между граундом и полоском при следующих значениях параметров линии: $w = 16.66$, $h = 1$, $\varepsilon = 4.4$ на частоте $f = 10$ ГГц.

Здесь и в дальнейшем все размеры даются в миллиметрах. Расчет проведен с использованием метода конечных элементов (МКЭ).

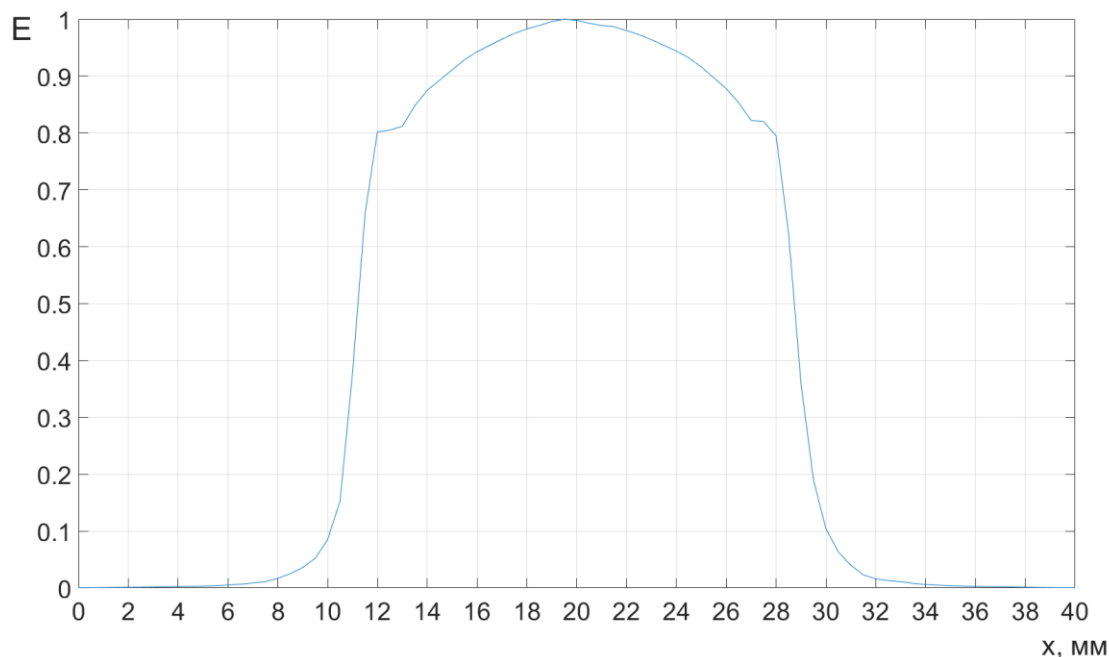


Рис. 2. Амплитудное распределение основной волны по ширине МПЛ

На рис.2 видно, что внутри МПЛ поле медленно меняется по закону, близкому к косинусоидальному, а вне МПЛ - быстро спадает. Для аппроксимации амплитуды поля внутри МПЛ будем использовать три типа аппроксимации: приближение Олинера [3], косинусоидальную аппроксимацию внутри МПЛ и нулевую вовне и смешанную аппроксимацию: косинусоидальную - внутри и экспоненциальную – вовне.

В рамках приближения Олинера амплитудное распределение z -вой компоненты электрического поля основной моды МПЛ имеет вид:

$$E(x) = \begin{cases} 1, & |x| < w_e / 2, \\ 0, & |x| > w_e / 2, \end{cases} \quad (1)$$

где w_e - эффективная ширина МПЛ. Эта величина определяется по известному алгоритму [3] и для достаточно широких линий (порядка длины волны) ее можно полагать равной $w + h/2$.

Косинусоидальная аппроксимация имеет вид:

$$E(x) = \begin{cases} \cos \sqrt{k^2 \varepsilon - U^2} x, & |x| < w/2, \\ 0, & |x| > w/2. \end{cases} \quad (2)$$

Косинусоидально - экспоненциальная аппроксимация имеет вид:

$$E(x) = \begin{cases} \cos \sqrt{k^2 \varepsilon - U^2} x, & |x| < w/2, \\ \cos \sqrt{k^2 \varepsilon - U^2} w/2 \exp(-\alpha(x - w/2)), & |x| > w/2. \end{cases} \quad (3)$$

Параметр α выбирается из условия максимального приближения поля к распределению поля основной моды МПЛ, получаемого на основе расчета с использованием МКЭ.

Отметим отличие полученного в результате значения показателя экспоненты $\alpha = 0.8$ от значения, которое дает метод эффективной диэлектрической проницаемости [4]:

$$\alpha = k \sqrt{U^2 - 1}. \quad (5)$$

При указанных выше параметрах $U = 2.059$ и формула (5) дает значение $\alpha = 0.378$.

Перейдем к вычислению характеристик излучения МП рупора. Для этого используем приближение Кирхгофа, полагая, что поле внутри МП рупора, в том числе в его апертуре, совпадает с полем цилиндрической волны, распределение амплитуды которой от угла ψ такое же, как у МПЛ от координаты x . В результате, для нормированной z -вой компоненты электрического поля получаем:

$$E_z(\rho, \varphi) = \frac{D(\rho, \varphi)}{D(\rho, 0)} \quad (6)$$

где

$$D(\rho, \varphi) = \left(1 - \frac{1}{ik} \frac{\partial}{\partial y}\right) \int_{-D/2}^{D/2} \frac{\exp(-ik\sqrt{x'^2 + R^2} + ikr(\rho, \varphi, x', y'))}{\sqrt{r(\rho, \varphi, x', y')}} A(\psi(x')) dx'$$

$$r(\rho, \varphi, x', y') = \sqrt{(\rho \sin \varphi - x')^2 + (\rho \cos \varphi - y')^2},$$

$$y = \rho \cos \varphi,$$

$A(\psi)$ комплексная амплитуда поля рупорной волны, ψ - угол:

$$\psi = \operatorname{arctg}\left(\frac{x}{R}\right).$$

Выражение для нормированной диаграммы направленности (ДН) имеет вид:

$$F(\varphi) = \frac{D(\varphi)}{D(0)}, \tag{7}$$

где

$$D(\varphi) = (1 + \cos \varphi) \int_{-D/2}^{D/2} \frac{\exp(-ik\sqrt{x^2 + R^2} + ikx \sin \varphi)}{(x^2 + R^2)^{1/4}} A(\psi(x)) dx,$$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$, $\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}$ - длина волны в диэлектрике, λ_0 - длина волны в свободном

пространстве, остальные обозначения понятны из рис.3

На рис. 4 показаны четыре амплитудных ДН МП рупора с параметрами $D = 2\lambda$, $R = 6\lambda$ ($\Psi \approx 10^\circ$) на частоте 10 ГГц, полученные с использованием МКЭ (синяя кривая), с использованием формулы (7) и косинусоидально - экспоненциальной аппроксимации с $\alpha = 0.8$, $U = 2.059$ (зеленая кривая), приближения Олинера (красная кривая) и тригонометрической аппроксимации (черная кривая).

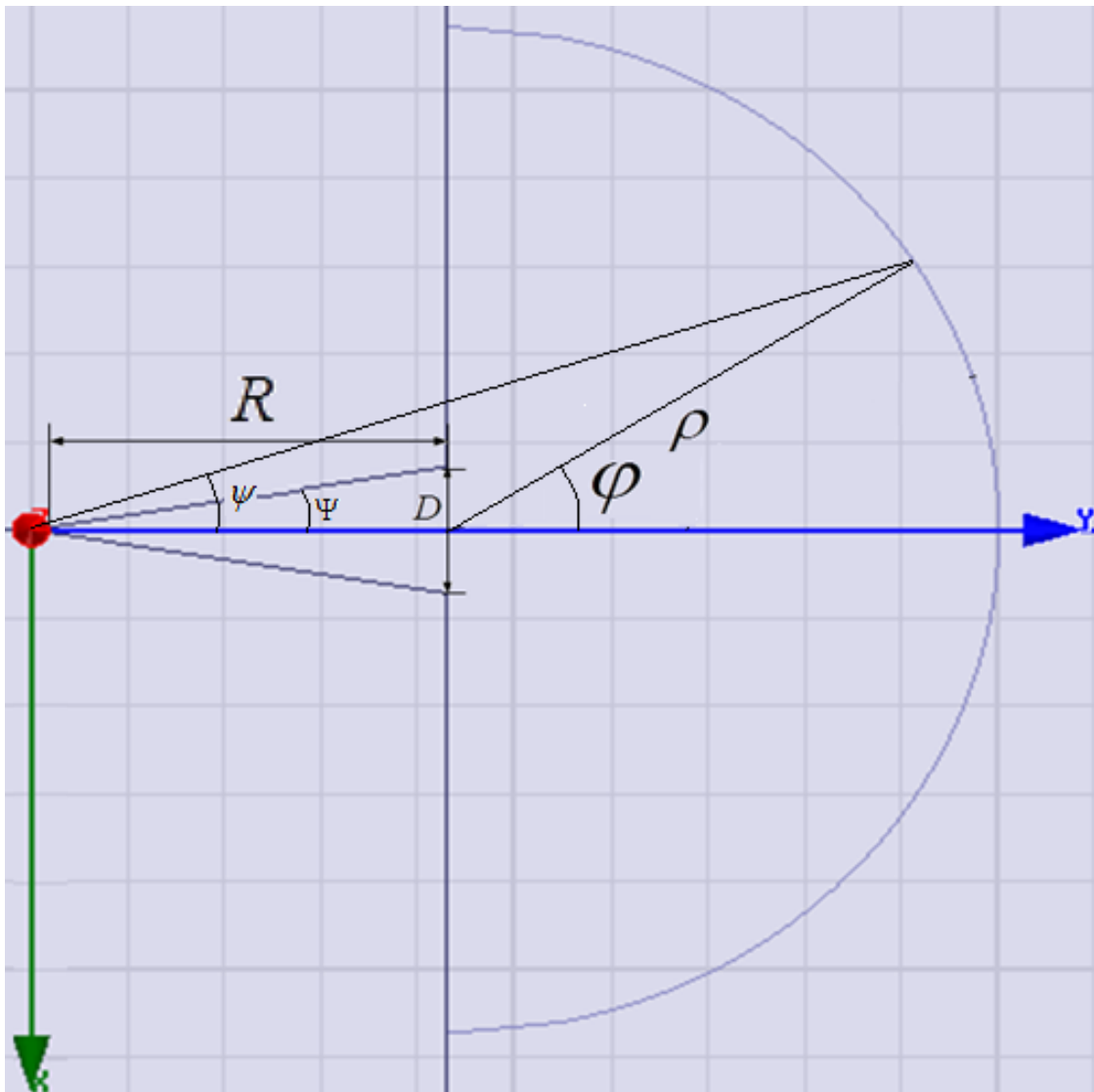


Рис. 3. К вычислению излучения МП рупора

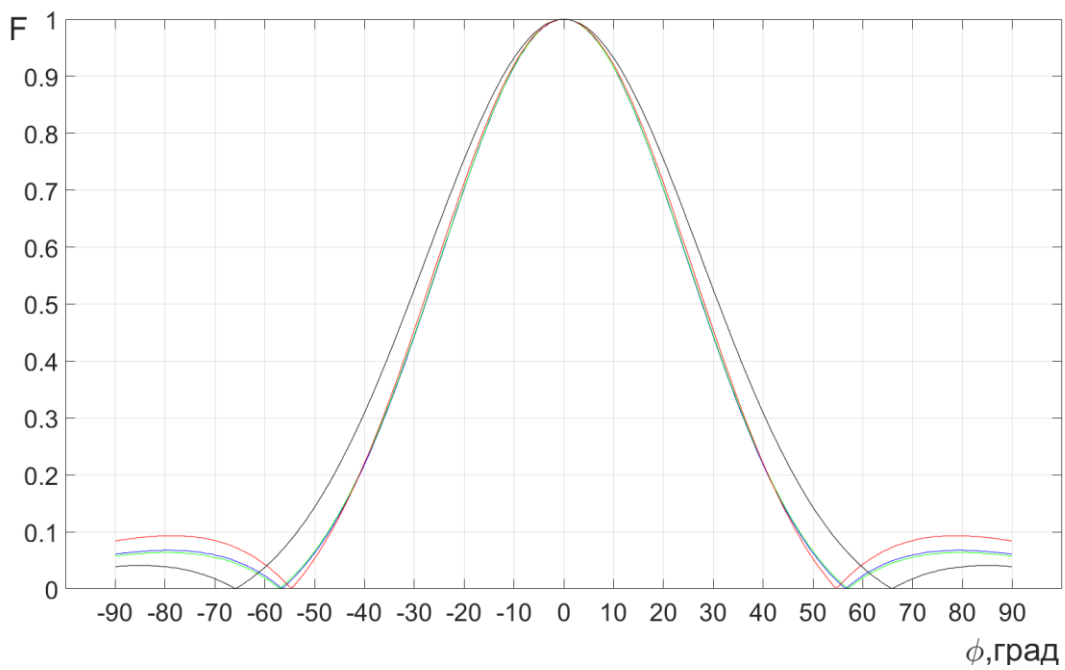


Рис. 4. Амплитудные ДН МП рупора

На рисунке не трудно увидеть, что кривые синего и зеленого цвета практически совпадают. Аппроксимация с использованием приближения Олинера также дает неплохое совпадение. Ширина главного лепестка и положение нулей ДН передается аппроксимацией с использованием приближения Олинера достаточно точно, а заметная погрешность наблюдается только на уровне боковых лепестков.

Наихудший результат дает тригонометрическая аппроксимация, несмотря на то, что она очень хорошо описывает поле внутри МП. Отсюда следует вывод, что на правильный расчет ширины ДН большее влияние оказывает пусть и приближенный, но учет внешнего поля, чем более точное представление внутреннего поля и полное пренебрежение внешним в тригонометрической модели.

Основываясь на полученных результатах, в дальнейшем для аппроксимации поля внутри МП рупора будем использовать модель на основе приближения Олинера. Кроме численного интегрирования в методе Кирхгофа для приближенного вычисления интеграла (6) будем использовать также первый член его асимптотического разложения, полученный методом стационарной фазы:

$$U(\varphi) = \frac{e^{ikr}}{\sqrt{kr}} [F(x1) - F(x2)] \quad (8)$$

где

$$x1 = \left| \sqrt{S3 - S1} \right| \operatorname{sgn}(\Psi - \psi);$$

$$x2 = \left| \sqrt{S4 - S2} \right| (-\operatorname{sgn}(\psi + \Psi));$$

$$S1 = S2 = kr;$$

$$S3 = k(l + r1);$$

$$S4 = k(l + r2).$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_{-\infty}^z e^{it^2} dt;$$

- интеграл Френеля, а величины $l, r, r1$ и $r2$ показаны на рис. 5.

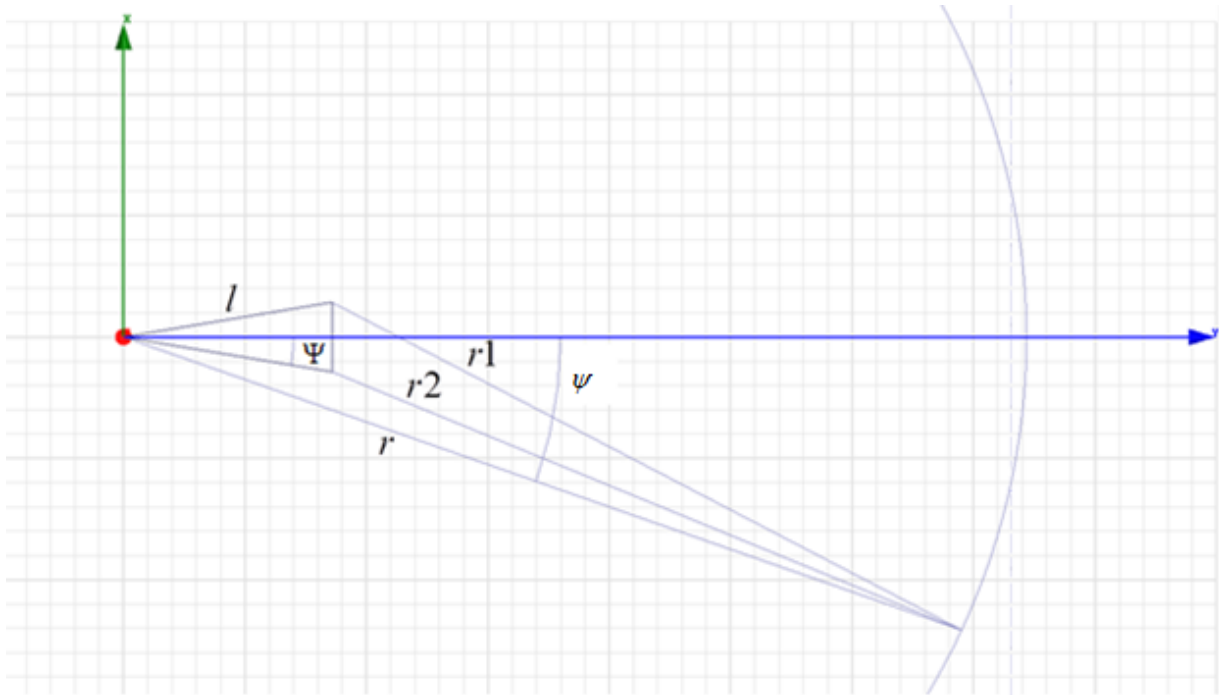


Рис. 5. К вычислению ДН МП рупора по асимптотической формуле

Отметим, что формула (8) совпадает с формулой для поля Е-секториального рупора, полученная в [5] с использованием геометрической теории дифракции.

Для дальней зоны вместо (8) для нормированной ДН получаем:

$$F(\varphi) = D(\varphi)/D(0) \quad (9)$$

где

$$D(\varphi) = \exp(G) [F(x_1) - F(x_2)]$$

$$G = ikR(1 - \cos(\varphi))$$

$$x_1 = (2kl)^{1/2} \sin((\varphi - \Psi)/2), \quad x_2 = - (2kl)^{1/2} \sin((\varphi + \Psi)/2),$$

Прежде, чем сравнивать три методики вычисления характеристик излучения МП рупора, исследуем зависимости как амплитудной, так и фазовой характеристик излучения описанного выше МП рупора от расстояния до апертуры, ограничиваясь использованием МКЭ.

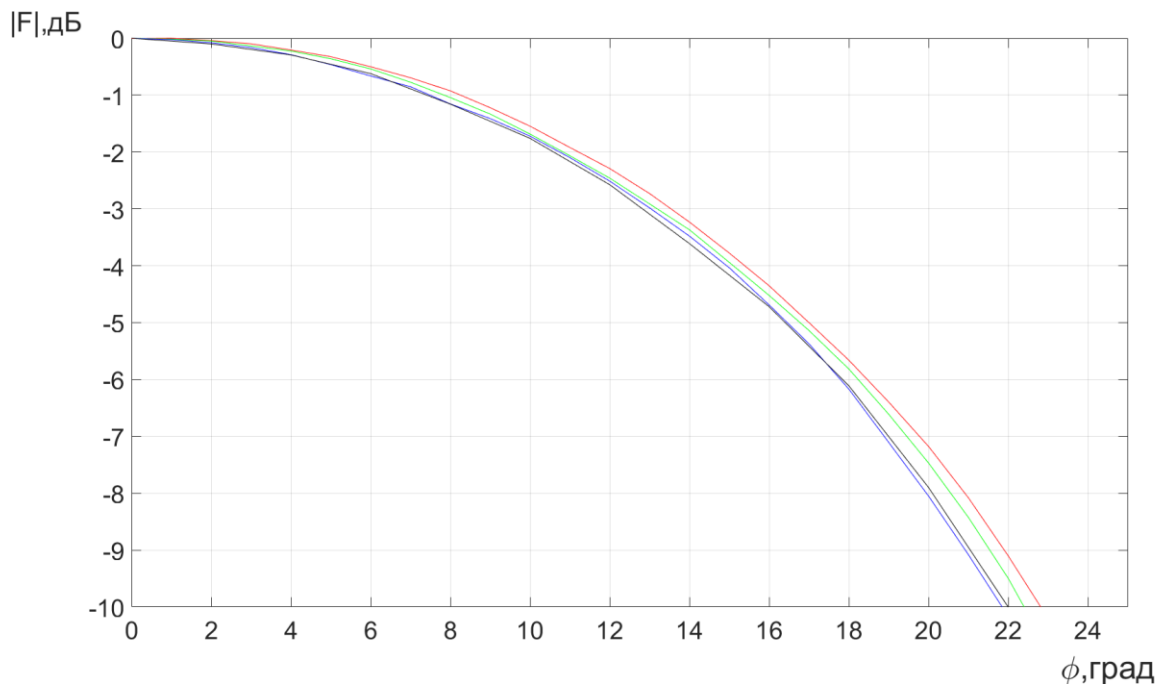


Рис. 6. Амплитуда поля МП рупора на расстояниях $\rho = 4,6,8,12\lambda$ - красный, зеленый, синий и черный графики, соответственно

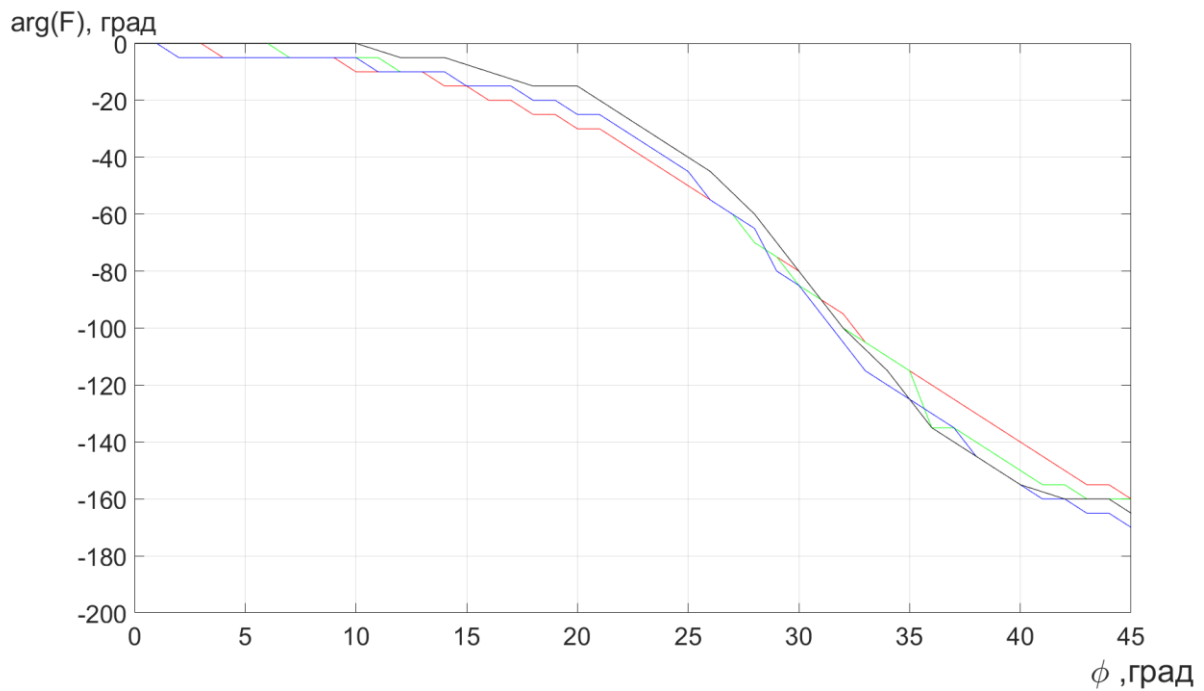


Рис. 7. Фаза поля МП рупора на расстояниях $\rho = 4,6,8,12\lambda$ - красный, зеленый, синий и черный графики, соответственно

На рис. 6 красной, зеленой, синей и черной кривой показаны зависимости амплитуды вычисленного с использованием МКЭ поля от угла φ соответственно, на расстояниях $\rho = 4, 6, 8, 12\lambda$ от начала координат. На рис.7 в тех же обозначения приведены аналогичные зависимости фазы поля. Видно, что амплитудные, и фазовые характеристики слабо отличаются, начиная с расстояния $\rho = 8\lambda$, которое равно расстоянию до дальней зоны синфазной апертуры. В дальнейшем ограничимся расчетами для дальней зоны.

Проведем расчет ДН с использованием трех методов на частоте 10 ГГц для 3-х МП рупоров с параметрами:

1. $R = 6\lambda$, $D = 2\lambda$ ($\Psi \approx 10^\circ$)
2. $R = 2.145\lambda$, $D = 2\lambda$ ($\Psi = 25^\circ$)
3. $R = 1.33\lambda$, $D = 2\lambda$ ($\Psi = 37^\circ$).

На рис. 8, 9, соответственно, приведены амплитудная и фазовая ДН 1-го МП рупора, полученные с использованием МКЭ (синяя кривая), методом численного интегрирования интеграла Кирхгофа (зеленая кривая) и при помощи асимптотической формулы (красная кривая).

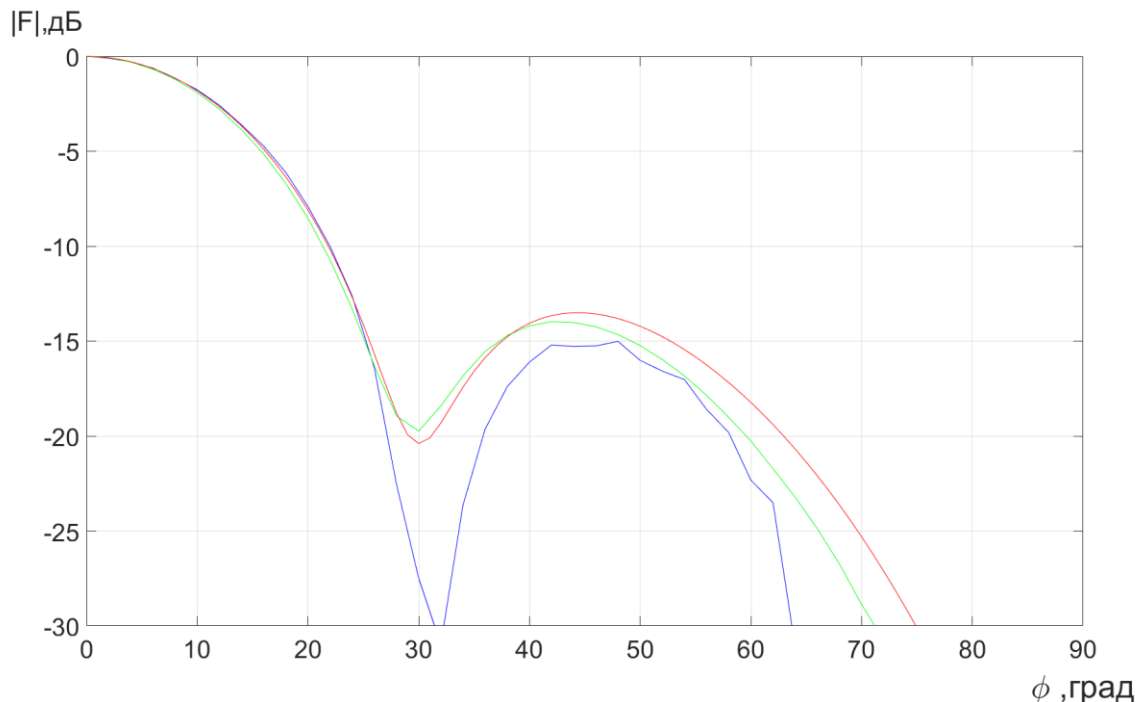


Рис. 8. Амплитудные ДН МП первого рупора ($\Psi \approx 10^\circ$)

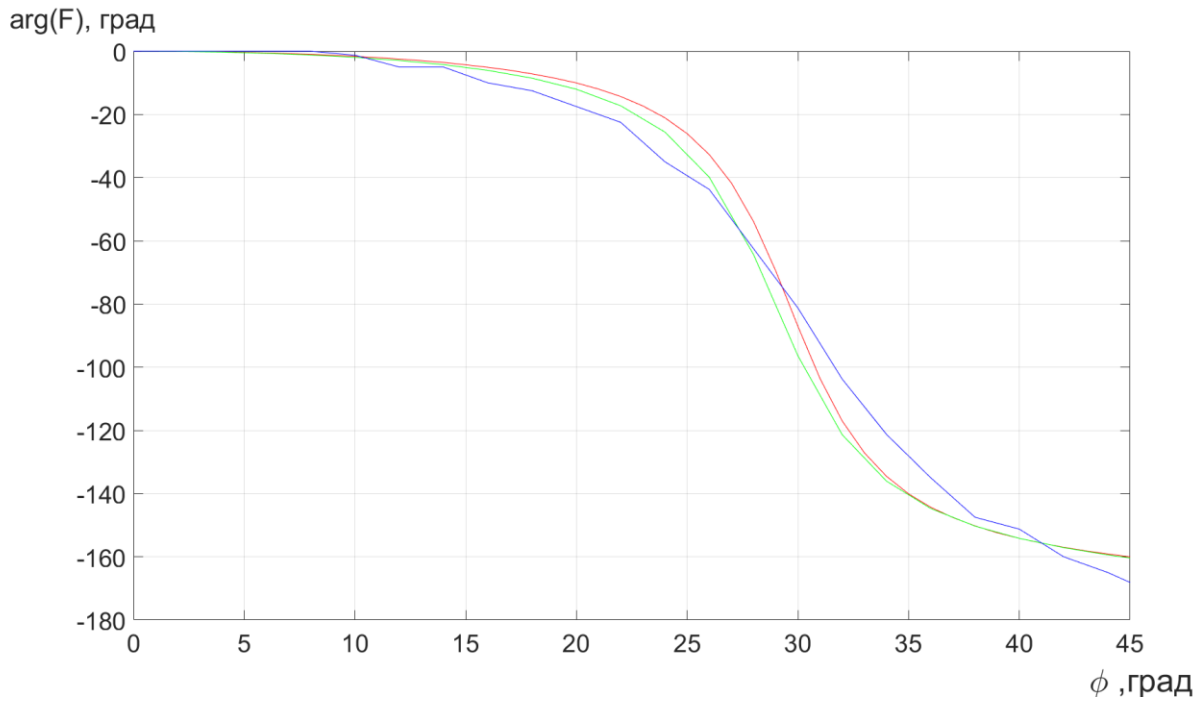


Рис. 9. Фазовые ДН МП рупора ($\Psi \approx 10^\circ$)

На рис. 10, 11 в тех же обозначениях приведены результаты расчета амплитудной и фазовой ДН 2-го МП рупора ($\Psi=25^\circ$). На рис. 12,13 в тех же обозначениях приведены результаты расчета амплитудной и фазовой ДН 3-го МП рупора ($\Psi=37^\circ$).

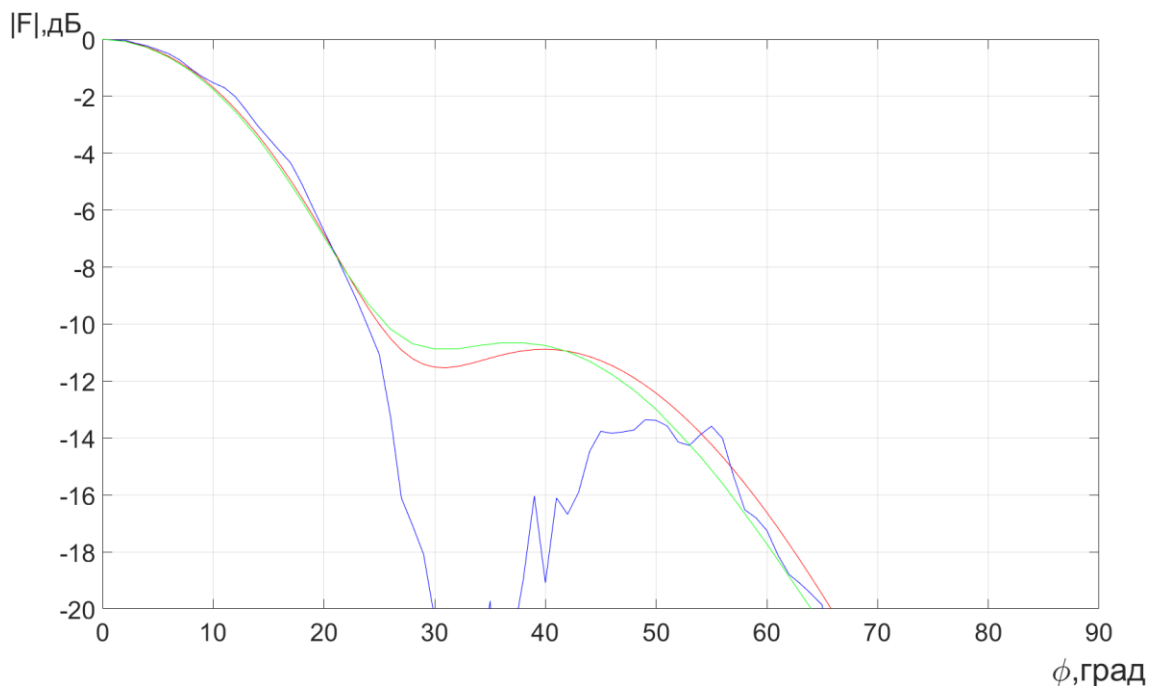


Рис.10. Амплитудные ДН для МП рупора ($\Psi=25^\circ$)

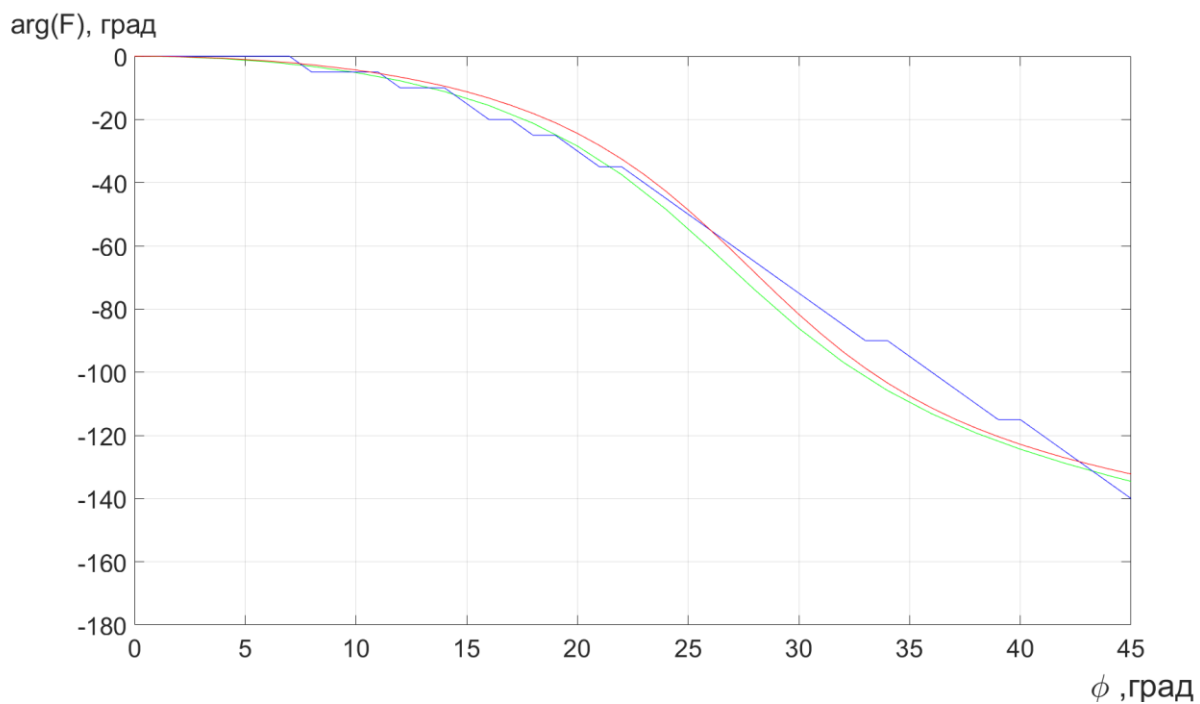


Рис. 11. Фазовые ДН МП рупора ($\Psi=25^\circ$)

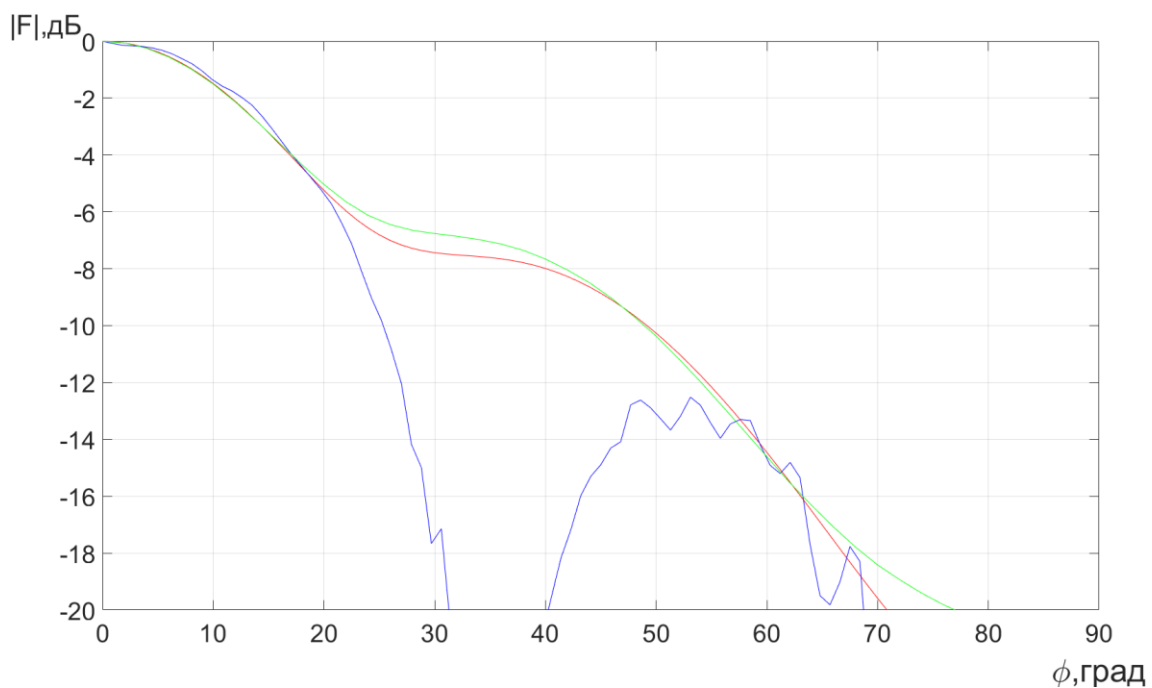
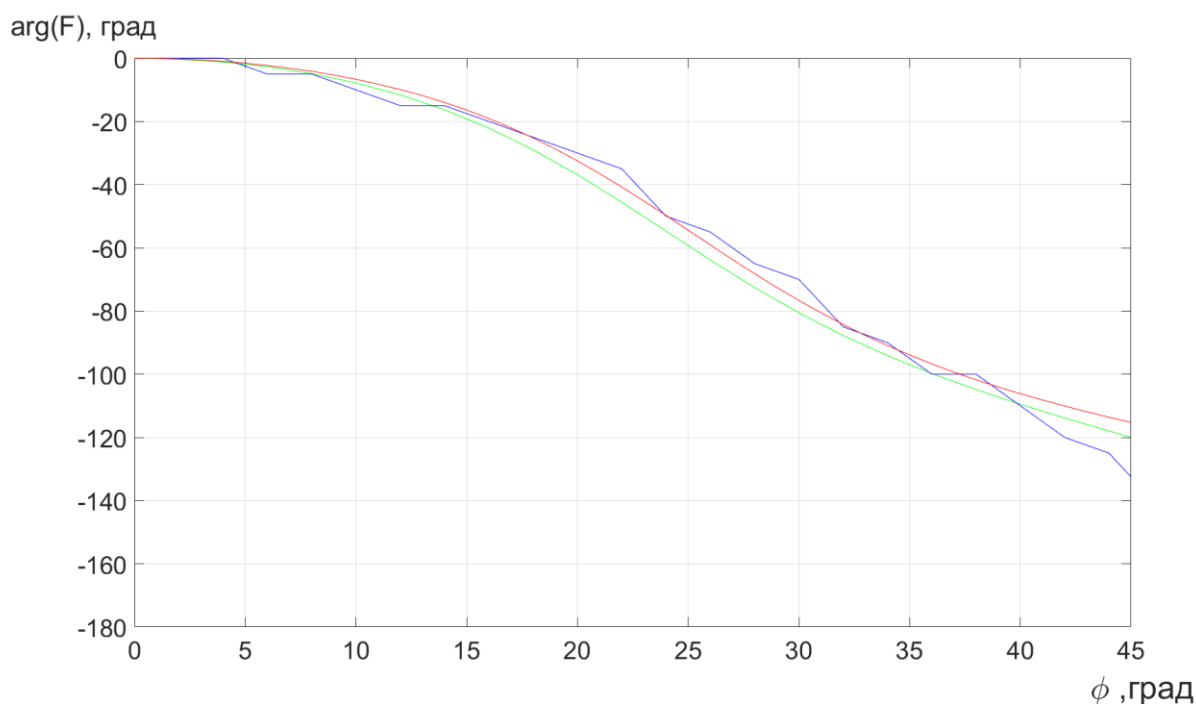


Рис.12. Амплитудные ДН для МП рупора ($\Psi=37^\circ$)

Рис.13. Фазовые ДН МП рупора ($\Psi=37^\circ$)**Выводы:**

1. Интеграл Кирхгофа и асимптотические формулы с использованием приближения Олинера позволяют достаточно точно описать фазовые ДН МП рупоров.
2. Интеграл Кирхгофа и асимптотические формулы с использованием приближения Олинера позволяют достаточно точно описать амплитудные ДН МП рупоров в области главного лепестка (до уровня – 10 дБ) при не очень больших углах раствора рупора.
3. Построение асимптотической модели излучения МП рупоров с углами раствора 2Ψ более 50 градусов требуют дальнейших исследований

Работа поддержана грантом РФФИ, проект № 07-07797.

Литература

1. R. C. Hansen, Design trades for Rotman lenses, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, vol. 39, no. 4, pp. 464–472.

2. J. L. Cruz, B. Gimeno, E. A. Navarro, and V. Such, The Phase Center Position of a Microstrip Horn Radiating in an Infinite Parallel-Plate Waveguide, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, vol. 42, no. 8, pp. 464–472.
3. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств. Под ред. Вольмана В.И. М.: Радио и связь. 1982.
4. Взятых В.Ф. Диэлектрические волноводы. М.: Сов. Радио. 1970.
5. Г.З.Айзенберг, В.Г.Ямпольский, О.Н.Терешин, Антенны УКВ, Часть 1, М.: Связь, 1977.

Ссылка на статью:

С. Е. Банков, Г. Г. Грачёв, В. А. Калошин. Об излучении микрополосковых рупоров. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr17/6/text.pdf>