

Исследование плоских симметричных антенн с линейно-расширяющимся раскрывом для антенных решеток

С.А. Парпула, В.П. Заярный, В.С. Гирич, В.Е. Аввакумов

Волгоградский государственный технический университет
400005, Российская Федерация, г. Волгоград
пр. им. В.И. Ленина, 28

Получены математические модели для плоских симметричных антенн СВЧ-диапазона с линейно расширяющимся раскрывом, позволяющие рассчитывать их диаграммы направленности в зависимости от конфигурации раскрыва. Экспериментально измерены диаграммы направленности для аналогичных антенн (в диапазоне 5,9–12,5 ГГц), установлено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Выявлены закономерности влияния конфигурации раскрыва исследовавшихся антенн на форму главного лепестка их диаграмм направленности, что принципиально важно для оптимизации электродинамических характеристик антенных решеток на их основе.

Ключевые слова: плоская симметричная антенна, линейно расширяющийся раскрыв, СВЧ-диапазон, диаграмма направленности, частота, дисковая антенная решетка.

Антенны и антенные устройства в радиотехнических системах являются важнейшим функциональным звеном, характеристики которого во многом определяют характеристики остальных функциональных блоков системы. В связи с чем, разработка и исследование характеристик новых антенн и антенных устройств на их основе (в том числе СВЧ-диапазона) представляет повышенный интерес и является актуальным. Следует отметить важность разработки адекватных математических моделей для проектируемых антенн, подтвержденных получаемыми экспериментальными данными, позволяющих заранее рассчитывать и прогнозировать их важнейшие характеристики, что также является востребованным и актуальным.

В данной работе исследуются плоские антенны (рис. 1), выполненные в виде симметричных щелей с линейно расширяющимся выходом (раскрывом), вырезанных в металлических пластинах с высокой проводимостью (медь, алюминий), толщиной порядка 0,3 мм, без диэлектрической подложки (2, рис. 1), которые предполагается использовать в составе дисковых антенных решеток. В данном случае питание всех антенн производилось через коаксиальный разъем (4, рис. 1), микрополосковую линию передачи (3, рис. 1) и симметричную щелевую линию (1, рис. 1).

Для разработки электродинамических моделей исследовавшихся антенн воспользуемся основными положениями из [1]. Для расчета диаграмм направленности (ДН) антенн, у которых изменение поперечного сечения раскрыва является линейным, произведем его регуляризацию, как показано на рис. 2. Такая регуляризация для конечного числа участков позволяет применить методику разработки моделей, приведенную в [2; 3] для каждого регулярного участка, и по их суммарному вкладу рассчитать ДН всей антенны.

Для подобной ступенчатой аппроксимации нерегулярной структуры шаг увеличения ширины щели должен быть много меньшим четверти длины волны [2]:

$$w_n - w_{n-1} = w_{n+1} - w_n = \Delta w \ll \frac{\lambda_0}{4}, \quad (1)$$

где w_n – ширина щели n -го регулярного участка направляющей структуры антенны; λ_0 – дли-

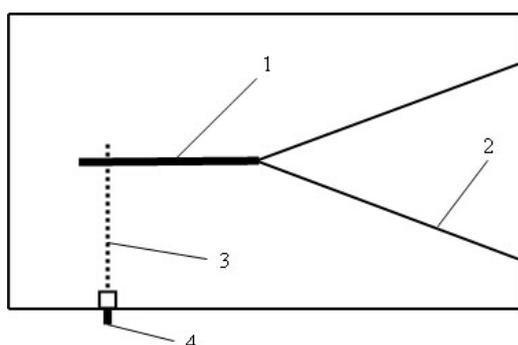


Рис. 1. Внешний вид исследовавшихся антенн: 1 – симметричная щелевая линия; 2 – расширяющаяся СЩЛ; 3 – питающая микрополосковая линия; 4 – коаксиальный разъем

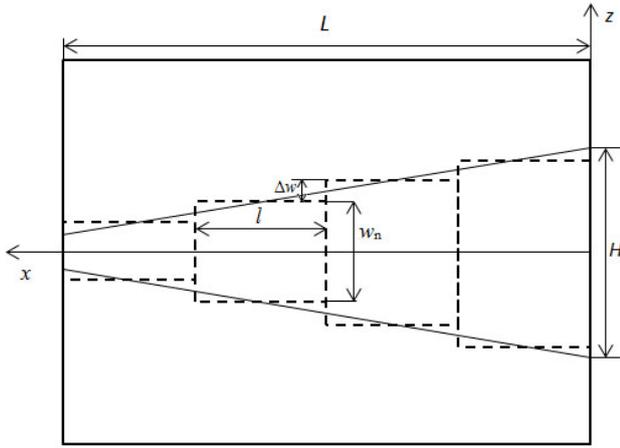


Рис. 2. Аппроксимация линейно расширяющегося раскрыва антенны регулярными участками

на волны электромагнитных колебаний на входе антенны.

При этом результирующее поле в дальней зоне будет определяться суммированием вклада в излучение, вносимого каждым регулярным участком, согласно выражению [1]:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N E_n(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где $E_n(\theta, \varphi)$ – вклад в поле дальней зоны n -м участком; θ, φ – угловые координаты в Е-плоскости и Н-плоскости ДН, соответственно.

Для сохранения условия бегущей вдоль направляющей структуры антенны волны необходимо, чтобы мощность, проходящая через каждый регулярный участок, оставалась постоянной

$$P_{n-1} = P_n = P_{n+1} = const. \quad (3)$$

Мощность, проходящая вдоль n -го участка регулярной структуры, может быть определена как

$$P_n = \frac{V_n^2}{Z_n}, \quad (4)$$

где V_n – разность потенциалов на n -м регулярном участке, а Z_n – его волновое сопротивление.

Выражение (2), с учетом (3), (4) и заменой V_n на поперечную составляющую поля регулярной симметричной щелевой линии (СЩЛ), положив $P_n = 1$ [1], можно записать:

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N \sqrt{Z_n} E_{0n}(\theta, \varphi), \quad (5)$$

где E_{0n} – поле излучения n -го регулярного участка, которое может быть определено по какой-либо модели антенны с щелью постоянной ширины, а Z_n можно определить по формуле [1]:

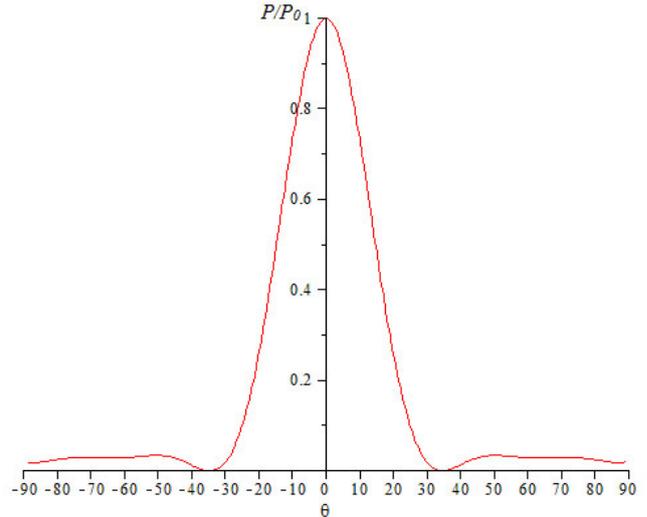


Рис. 3. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 60$ мм

$$Z_n = \frac{60\pi^2}{\ln\left(\frac{2H}{w} + \sqrt{\left(\frac{2H}{w}\right)^2 - 1}\right)}. \quad (6)$$

Процедура ступенчатой аппроксимации может быть автоматизирована или произведена вручную. Произведенные расчеты показывают, что результаты хорошо сходятся, когда значение $\Delta w = \lambda_0 / 8$ [4; 5].

Как показано в [1], поперечная компонента электрической напряженности электромагнитного поля для n -го регулярного участка антенны (рис. 2) определяется следующим выражением:

$$E_\theta(\theta, \varphi) = \frac{j\omega\varepsilon w \sin \varphi e^{-jk_0 r}}{4\pi^2 r} \times \int_{-w/2}^{w/2} \frac{e^{jk_0 z' \cos \theta}}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 - z'^2}} dz' \int_0^L e^{jk_0 x' \sin \theta \cos \varphi} e^{k_x x'} \times \left[1 + e^{j\frac{\pi}{4} F\left(v\sqrt{\frac{\pi}{2}}\right)} + \frac{\sqrt{2}e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{-j\frac{\pi}{2} v^2}}{\pi v} \right] dx'. \quad (7)$$

Здесь

$$F(v) = \int_0^v e^{-jt^2} dt$$

– интеграл Френеля;

$$v = \sqrt{\frac{2k_0 x' \sin \theta (1 + \cos \varphi)}{\pi}};$$

ω – частота электромагнитных колебаний на входе антенны; k_0 – волновое число; j – мнимая единица; t – время.

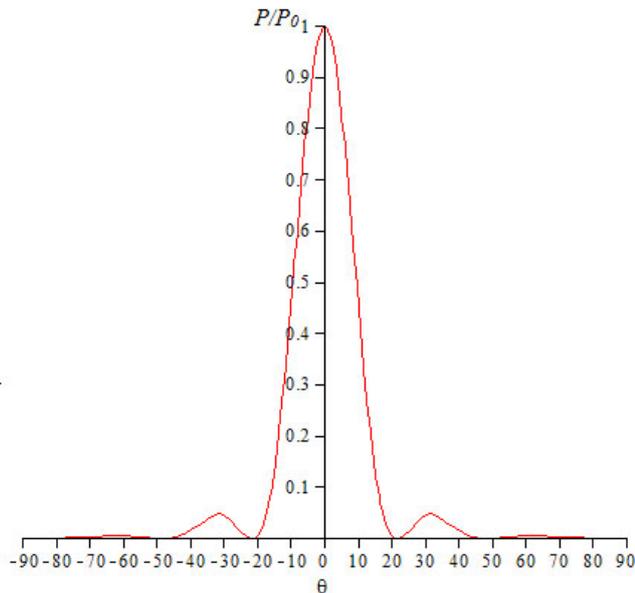


Рис. 4. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 90$ мм

Интегралы в расчетных формулах находятся численно, а построение ДН в случае постоянной ширины щели в главных плоскостях производится нормированием результатов при $\theta = \pi$ для Е-плоскости и $\varphi = \pi/2$ для Н-плоскости [6].

Расчеты ДН производились для антенн, имевших длину L в пределах $(1 \div 5\lambda)$, и ширину раскрыва H в пределах $(1 \div 3\lambda)$ мм, на частоте 10 ГГц, для Е-плоскости электромагнитных колебаний. На рис. 3 приведена диаграмма направленности, полученная в результате моделирования с использованием (5)–(7) для случая $L = 150$ мм и $H = 60$ мм. Видно, что ширина ДН по уровню половинной мощности составляет порядка 30° , а уровень боковых лепестков (УБЛ) имеет значение порядка 0,05 от мощности излучения непосредственно перед антенной (при $\theta = 0$).

В качестве проверки адекватности полученных результатов также производилось построение ДН для одного регулярного участка ($s_n = 0$). Эти ДН сравнивались с экспериментально полученными результатами для регулярной антенны в [7]. Сравнительный анализ опытных данных и результатов моделирования показал, что имевшие при этом место расхождения ДН были незначительными (в пределах 5%). Наилучшим образом результаты совпадают в случае, когда значение $\Delta w = \lambda_0/8$. Это свидетельствует об адекватности полученных модельных представлений и возможности их использования для моделирования ДН подобных антенн с любыми параметрами, а также ДН

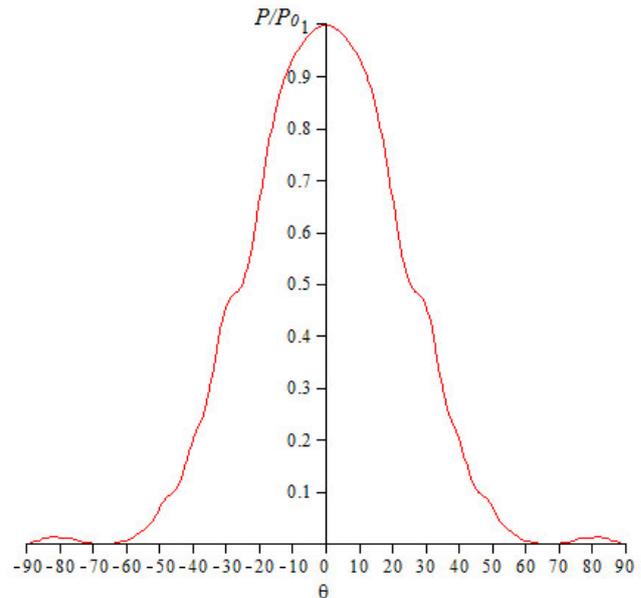


Рис. 5. Рассчитанная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 30$ мм

более сложных антенных систем (решеток) на их основе.

Расчет ДН исследуемой антенны при изменении ширины раскрыва (размера H , при постоянной длине $L = 5\lambda = 150$ мм) в большую ($H = 3\lambda = 90$ мм) и меньшую ($H = \lambda = 30$ мм, рис. 5) сторону показал следующее. При увеличении размера антенны H , главный лепесток ДН существенно сужается (рис. 4), а ее ширина по уровню половинной мощности составляет порядка 20° . При уменьшении размера H , главный лепесток ДН существенно расширяется (рис. 5), а ее ширина по уровню половинной мощности составляет порядка 46° .

Из этих графиков также видно, что для постоянной длины антенны L при увеличении ее размера H , УБЛ возрастает, но не превышает уровня 0,1 от максимальной мощности излучения.

Для проведения натурального эксперимента был сконструирован набор антенн, у которых, также, при длине антенны L равном 150 мм (5λ) ширина раскрыва H изменялась в пределах $(1 \div 3\lambda)$. Ширина щелевой линии w (1, рис. 1) для всех антенн выбиралась одинаковой ($w = 3$ мм). Проектирование антенн с учетом их электродинамических свойств производилось с учетом основных положений, изложенных в [8–10], измерение их диаграмм направленности производилось на установке, описанной в [11; 12].

На рис. 6–8 представлены диаграммы направленности антенн в Е- и Н-плоскостях с шириной раскрыва $H = 30$ мм (1λ), 60 мм (2λ) и 90 мм (3λ),

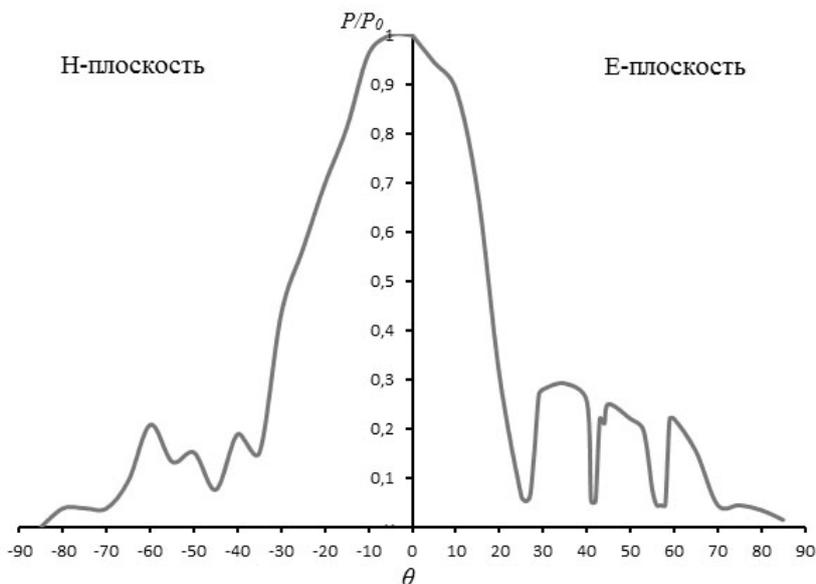


Рис. 6. Экспериментально измеренная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 30$ мм

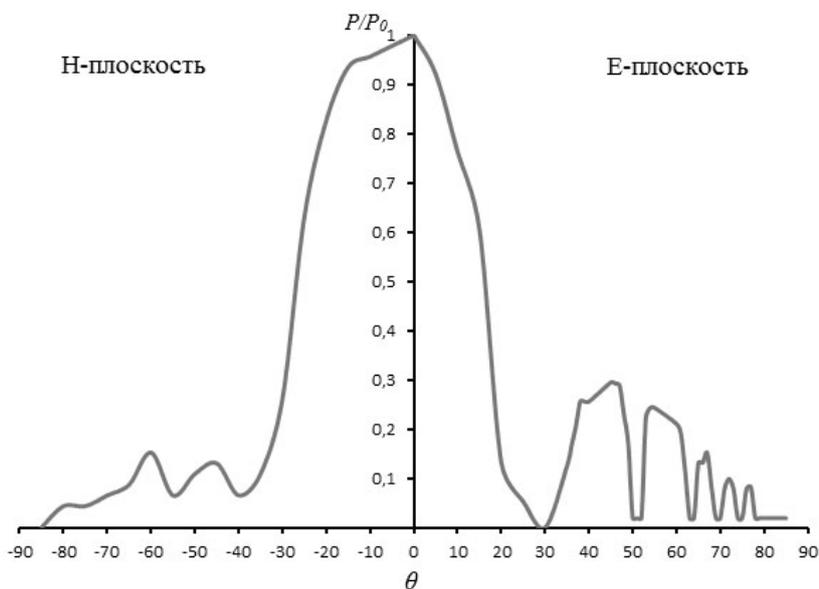


Рис. 7. Экспериментально измеренная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 60$ мм

соответственно. Следует отметить, что форма ДН, измеренных на частоте 10 ГГц сохранялась практически неизменной в диапазоне частот 5,9–12,5 ГГц.

Из анализа экспериментально измеренных ДН видно, что при увеличении раскрыва антенны, их главный лепесток, как и в случае расчетных ДН (для Е-плоскости), сужается. При этом ширина экспериментально полученных ДН по половинной мощности составляла порядка 48° – в случае $H = 30$ мм (1λ), 32° – в случае $H = 60$ мм (2λ) и 20° – в случае $H = 90$ мм (3λ), что хорошо согласуется с результатами расчета. Уровень боковые лепестков у экспериментально полученных ДН несколько выше, чем у расчетных и не превышал 0,3 от максимальной мощности.

Из графиков рис. 6–8 также видно, что в Н-плоскости главные лепестки ДН для одних и тех же значений раскрыва антенн несколько шире, чем в Е-плоскости. При этом их ширина, при изменении раскрыва антенн, оставалась практически неизменной. Кроме того, в Н-плоскости имеет место тенденция к увеличению УБЛ при увеличении раскрыва антенны, также, как в случае расчетных ДН.

Из полученных расчетных и экспериментальных результатов исследования плоских симметричных антенн с линейно расширяющимся выходом видно, что имеется явная зависимость ширины главного лепестка ДН в Е-плоскости от угла раскрыва (размера H). Это позволяет использовать данные разновидности антенн

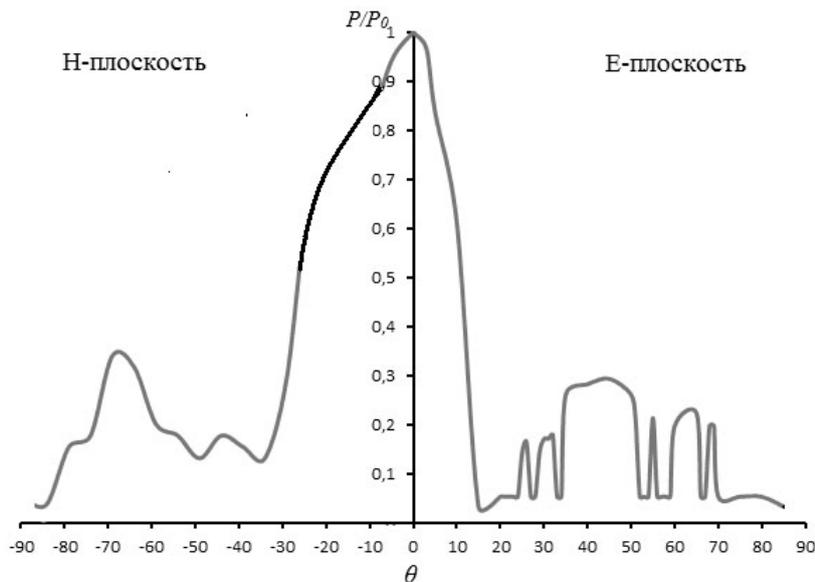


Рис. 8. Экспериментально измеренная диаграмма направленности исследуемой антенны для случая $L = 150$ мм, $H = 90$ мм

в качестве базовых элементов в составе более сложных антенных системах, таких как дисковые антенные решетки [7], для улучшения и оптимизации их электродинамических характеристик. Полученные модельные представления позволяют заранее рассчитывать оптимальные геометрические размеры базовых элементов для соответствующих разрабатываемых новых перспективных антенных систем в области радио-, видеолокации, при разработке охранных систем и других радиоэлектронных устройств.

Список литературы

1. Janaswamy R, Schaubert DH, Pozar DM. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // *Radio Science*. 1986. V. 21. P. 797–804.
2. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ-диапазона // *Известия вузов «Радиофизика»*. 2009. Т. 52. № 4. С. 328–335.
3. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Изучение электродинамических характеристик плоских коротких антенн и антенных решеток СВЧ-диапазона // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2008. Т. 11. № 4. С. 33–39.
4. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / пер с фран. под ред. К.С. Шифрина. М.: Наука, 1965. 780 с.
5. Уолтер К. Антенны бегущей волны / пер. с англ. под ред. А.Ф. Чаплина. М.: Энергия, 1970. 448 с.
6. Tai C.T. Dyadic Green's Functions in Electromagnetic Theory. N.-Y.: IEEE Press, 1993.
7. Дисковая антенна кругового обзора на симметричных щелевых излучателях / А.А. Фролов [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2012. Т. 15. № 4. С. 84–87.
8. Неганов В.А., Раевский С.В., Яровой Г.П. Линейная макроскопическая электродинамика / под ред. В.А. Неганова. Т. 1. М.: Радио и связь, 2000. 509 с.
9. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн: учебное пособие для вузов / под ред. В.А. Неганова. М.: Радио и связь, 2002. 416 с.
10. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайневых частот. М.: Наука; Физматлит, 1996. 304 с.
11. Заярный В.П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.
12. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Информационно-управляющая система для измерения характеристик антенн СВЧ-диапазона // *Известия Волгоградского государственного технического университета. Сер. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь*. 2008. Вып. 2. С. 77–80.

Research of plane symmetric antennas with the linear extending aperture for antenna grids

S.A. Parpula, V.P. Zayarny, V.S. Girich, V.E. Avvakumov

Mathematical models for plane symmetric antennas microwave range with linearly extending aperture, allowing to calculate their direction characteristics depending on an aperture configuration are received. Experimentally direction characteristics for similar antennas are measured (in the range of 5,9–12,5 GHz), good compliance of estimated and experimental results is set. Regularities of influence of a configuration of an aperture of researched antennas on the form of the principal lobe of their direction characteristics that is essentially important for optimization of electrodynamic characteristics of antenna grids on their basis are revealed.

Keywords: the plane symmetric antenna, linearly extending slot, microwave range, the direction pattern, frequency, a disk antenna grid.

Неганов, В.А.

Теория и применение устройств СВЧ: учебн. пособие для вузов / В.А. Неганов, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радио и связь, 2006. – 720 с.

ISBN 5-256-01812-4

В.А. Неганов, Г.П. Яровой

**ТЕОРИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ
УСТРОЙСТВ СВЧ**



УДК 621.396.67

ББК 32.840

Н 41

В учебном пособии рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, согласующих и трансформирующих устройств, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах (умножителей, смесителей, переключателей, выключателей). Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, измерительной аппаратуре и т. д. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Учебное пособие может использоваться как справочник по устройствам СВЧ.

Для специалистов в области теории и техники СВЧ, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов старших курсов радиотехнического и радиофизического профиля.