

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МОНОПОЛЬНЫХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИСКОВЫХ АНТЕННАХ

На основании экспериментальных исследований и численного моделирования определено влияние дифракционных эффектов на характеристики излучения цилиндрических монополярных антенн и диэлектрических дисковых антенн при изменении электродинамических параметров их составных частей. В частности, установлено, что осциллирующие зависимости угла максимального излучения и резонансной частоты монополярных цилиндрических антенн с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ от радиуса экрана объясняются различной структурой распределения электромагнитного поля в индуктивной зоне антенн с радиусом экрана кратным $\lambda/2$ и кратным нечетному числу $\lambda/4$ (λ – длина волны в свободном пространстве). Показано, что в индуктивной зоне исследуемых антенн формируются пространственные распределения электромагнитного поля в виде “пространственной волновой решетки”.

Ключевые слова: цилиндрическая монополярная антенна, диэлектрическая дисковая антенна, дифракция, интерференция

1. Введение

Необходимо отметить, что при создании высокочастотных малогабаритных антенн актуальным становится вопрос о влиянии дифракционных эффектов на краях излучающей апертуры на характеристики антенны. Известные результаты исследования данного вопроса применительно к различным типам антенн описаны в ряде работ [1–6]. В работе [1] рассмотрен открытый конец коаксиального волновода с круглым и квадратным металлическими фланцами–экранами с геометрическими размерами до 9λ (λ – длина волны в свободном пространстве). Показано, что при увеличении размера круглого экрана уровень задних лепестков не изменяется, в то время как в случае применения квадратного экрана уровень задних лепестков увеличивается при увеличении размера экрана. При этом авторы отмечают, что вне зависимости от формы экрана угол максимальной интенсивности излучения одинаков для обеих геометрий.

Применительно к антенным решеткам, основным элементом которых является цилиндрический монополь, влияние края экрана на характеристики такой антенны рассматривается в работе [2]. Авторы установили, что с точки зрения влияния размера экрана на фокусировку главного лепестка излучения оптимальным яв-

ляется размер экрана равный 1.5λ в случае, когда антенная решетка состоит из шести элементов. В работе [3] предлагается круглый экран с загнутым краем в теневой области антенной решетки, состоящей из цилиндрических монополярных антенн. Здесь авторы подробно исследуют зависимость изменения угла максимального излучения антенны от размера экрана и показывают, что при увеличении размера экрана угол максимального излучения изменяется неравномерно. При этом наилучшими характеристиками излучения обладает антенна, у которой общая длина экрана и загнутого края составляет около $3\lambda/4$, а высота загнутого края изменяется в пределах $(0.2 \div 0.3)\lambda$.

Из вышесказанного следует, что при разработке СВЧ антенн, ориентированных на применение в современных системах связи, учет краевых эффектов является необходимым.

В настоящей работе изучаются дифракционные эффекты, возникающие на ограниченных апертурах аксиально-симметричных антенн, таких, как цилиндрические монополярные антенны и диэлектрические дисковые антенны (ДДА). При этом используется подход, основанный на анализе пространственных распределений электромагнитного (ЭМ) поля в ближней зоне антенны, что позволяет установить и объяснить закономерности изменения характеристик излучения указанных выше антенн в зависимости от размера излучающей апертуры.

2. Антенны и методика исследований

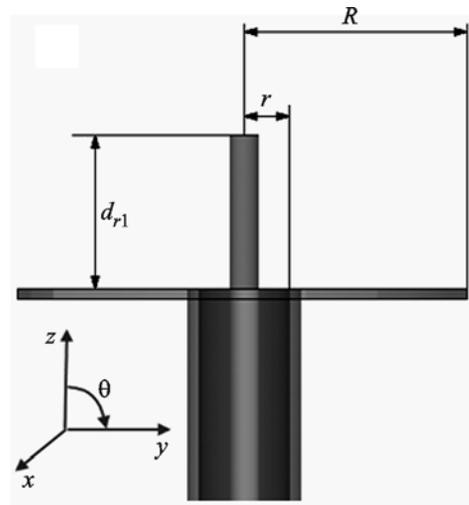
В представленной работе проводилось комплексное исследование характеристик антенн в зонах излучения, определенных в работе [6].

Численное моделирование монополярной антенны осуществлялось с помощью программного пакета “Импульс”, в котором проблема эффективного ограничения пространства счета решалась с помощью точных “поглощающих” условий [7, 8]. Программный пакет “Импульс” позволяет рассчитать все пространственно-временные и пространственно-частотные характеристики аксиально-симметричных антенн, возбуждаемых как импульсом, так и монохроматической волной. В пакете используется стандартный алгоритм конечных разностей. Для решения начально-краевых задач предполагается, что антенна возбуждается импульсом TE_0 - или TM_0 -волны, проходящей через сечение волновода.

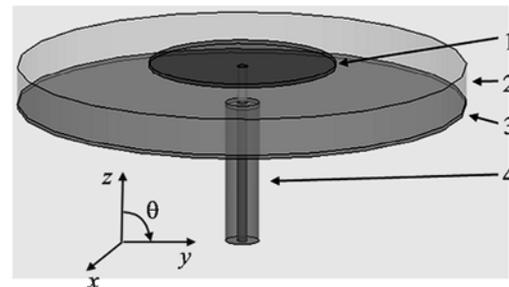
Экспериментальные исследования представленных в работе антенн проводилось на автоматизированных стендах для измерения пространственных распределений ЭМ полей антенн в индуктивной, волновой и дальней зонах [9, 10].

Исследуемая цилиндрическая монополярная антенна представляла собой вертикальный монополь высотой d_{r1} , образованный отрезком центральной жилы коаксиального кабеля, который находился над круглым металлическим экраном радиуса R ; толщина экрана 0.5 мм (см. рис. 1, а). Высоты монополей выбирались равными $d_{r1} = \lambda/4 = 7.5$ мм (здесь и далее $\lambda = 30$ мм) и $d_{r1} = 3\lambda/4 = 22.5$ мм. Радиус экрана R варьировался в пределах $R = 7.5 \div 110$ мм с дискретом 7.5 мм.

ДДА представляла собой диэлектрический диск радиусом R_d с диэлектрической проницаемостью ϵ_{rd} и толщиной H_d , расположенный на диэлектрической подложке с диэлектрической проницаемостью ϵ_r . Последняя находилась на металлическом экране радиусом R , который был равен радиусу диэлектрической подложки. Высота диэлектрической подложки составляла d_{r1} , что соответствует высоте монополя, используемого для возбуждения антенны (см. рис. 1, б). Диэлектрические проницаемости диэлектрического диска и подложки составляли $\epsilon_{rd} = 90$ и $\epsilon_r = 2.6$ соответственно.



а



б

Рис. 1. Геометрия исследуемых цилиндрической монополярной антенны (а) и ДДА (б): 1 – диэлектрический диск, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – металлический экран, 4 – коаксиальный кабель

Для установления закономерностей изменения характеристик излучения ДДА варьировались следующие параметры: радиус металлического экрана совместно с радиусом диэлектрической подложки, $2 \text{ мм} < R < 110 \text{ мм}$; толщина подложки, $1 \text{ мм} < d_{r1} < 8 \text{ мм}$; радиус диэлектрического диска, $2 \text{ мм} < R_d < 45 \text{ мм}$; толщина диэлектрического диска, $0.1 \text{ мм} < H_d < 2 \text{ мм}$.

3. Цилиндрическая монополярная антенна

Наиболее адекватным подходом к изучению краевых эффектов, обусловленных дифракцией ЭМ волн на конечных апертурах, может служить привлечение для этих целей информации об амплитудных распределениях полей в ближней зоне антенны. Причем анализу должны подлежать распределения полей как в индуктивной, так и

в волновой зонах антенн, что позволит изучить и проанализировать динамику трансформации волновых пучков в процессе формирования диаграммы направленности (ДН). Особое значение такие исследования приобретают в наиболее сложном случае с точки зрения изучения дифракционных явлений, когда размеры исследуемых объектов становятся соизмеримыми с рабочей длиной волны. Применительно к классу аксиально-симметричных антенн можно рассматривать две области источников краевых волн, а именно: внешний край металлического экрана и край внутреннего центрального отверстия, выполняющего роль элемента связи с коаксиальным кабелем. Интерференция этих краевых волн с первичным волновым пучком монополя в окружающем антенну пространстве и обуславливает тот или иной вид формируемой кольцевой интерференционной картины ЭМ поля в индуктивной зоне. Поэтому установление закономерностей формирования таких интерференционных картин приобретает основополагающее значение, позволяя выявить взаимосвязь физических параметров антенн с видом их ДН.

Исходя из предложенной концепции, исследование дифракционных эффектов в цилиндрической монопольной антенне с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ начнем с измерения распределений ЭМ полей в индуктивной зоне антенны, где влияние размера экрана на формируемое антенной излучение проявляется наиболее наглядно.

Анализ полученных распределений H_ϕ компоненты поля позволяет разделить исследованные антенны на две группы: с радиусами экрана кратными $\lambda/2$ (первая группа) и нечетному числу $\lambda/4$ (вторая группа). Так, для антенн первой группы на расстоянии 1 мм от плоскости экрана мы наблюдаем распределение ЭМ поля с максимумом в центре антенны (рис. 2, а). По мере приближения к краю антенны интенсивность ЭМ поля уменьшается. Минимум амплитуды H_ϕ компоненты ЭМ поля находится на расстоянии $\approx \lambda/4$ от края диска. А далее интенсивность ЭМ поля снова возрастает, и в непосредственной близости от края антенны наблюдается достаточно высокий уровень излучения (приблизительно в два раза меньше, чем в центральной части антенны). Необходимо отметить, что с увеличением радиуса экрана расстояние, на котором

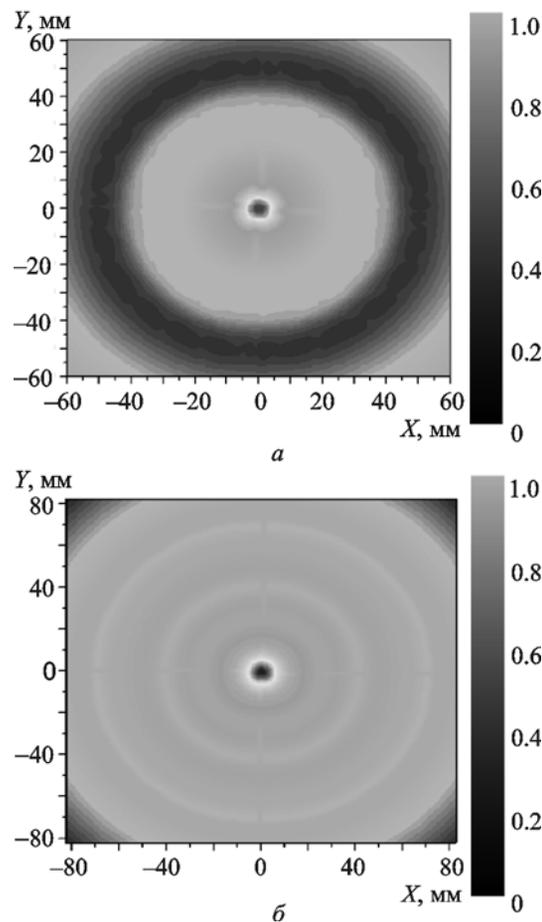


Рис. 2. Распределения H_ϕ компоненты электромагнитного поля в индуктивной зоне антенн: а) – $R = 60$ мм и б) – $R = 82.5$ мм

находится минимум амплитуды H_ϕ компоненты поля, не изменяется, но при этом увеличивается размер центрального пятна в распределении ЭМ поля. Таким образом, особенностью антенн первой группы является наличие только двух вариаций поля вдоль радиуса экрана с одним минимумом, находящимся на фиксированном расстоянии от края антенны.

Для второй группы антенн было установлено, что интерференционная картина ЭМ поля в индуктивной зоне имеет вид кольцевой “пространственной волновой решетки” (рис. 2, б). При этом число вариаций ЭМ поля вдоль радиуса экрана возрастает по мере его увеличения. Таким образом, особенностью антенн второй группы является появление при увеличении радиуса экрана распределений ЭМ полей в виде “пространственной волновой решетки”.

Проанализируем наблюдаемые в экспериментах зависимости резонансной частоты антенн обеих групп от геометрических размеров экрана (рис. 3, а). Резонансная частота антенн первой группы растет при увеличении радиуса экрана вплоть до значения $R = 2\lambda$. При последующем увеличении радиуса экрана значение резонансной частоты антенны уменьшается. Для антенн второй группы изменение резонансной частоты происходит противоположным образом, а именно, резонансная частота антенны уменьшается при увеличении размера экрана, достигая своего минимального значения при $R = 7\lambda/4$, а далее резонансная частота начинает возрастать. И соответственно зависимость резонансной частоты от радиуса экрана всего ряда исследуемых антенн имеет осциллирующий характер (рис. 3, б).

Проведенный анализ полученных ДН [11] позволяет выявить закономерность изменения главного направления излучения исследуемых антенн

в зависимости от радиуса экрана. А именно, для антенн первой группы зависимость угла максимального излучения от радиуса экрана имеет экстремальный вид. Для антенн второй группы эта зависимость характеризуется плавным увеличением угла максимального излучения при увеличении радиуса экрана (рис. 3, в). Таким образом, суммарный график изменения угла максимального излучения для всех исследуемых антенн при увеличении радиуса экрана представляет собой осциллирующую зависимость (рис. 3, г). При этом угол максимального излучения по мере увеличения радиуса экрана стремится к значению $\theta = 90^\circ$.

Полученные осциллирующие зависимости резонансной частоты и угла максимального излучения от радиуса экрана для антенн с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ обусловлены различием пространственных распределений ближних полей антенн первой и второй групп.

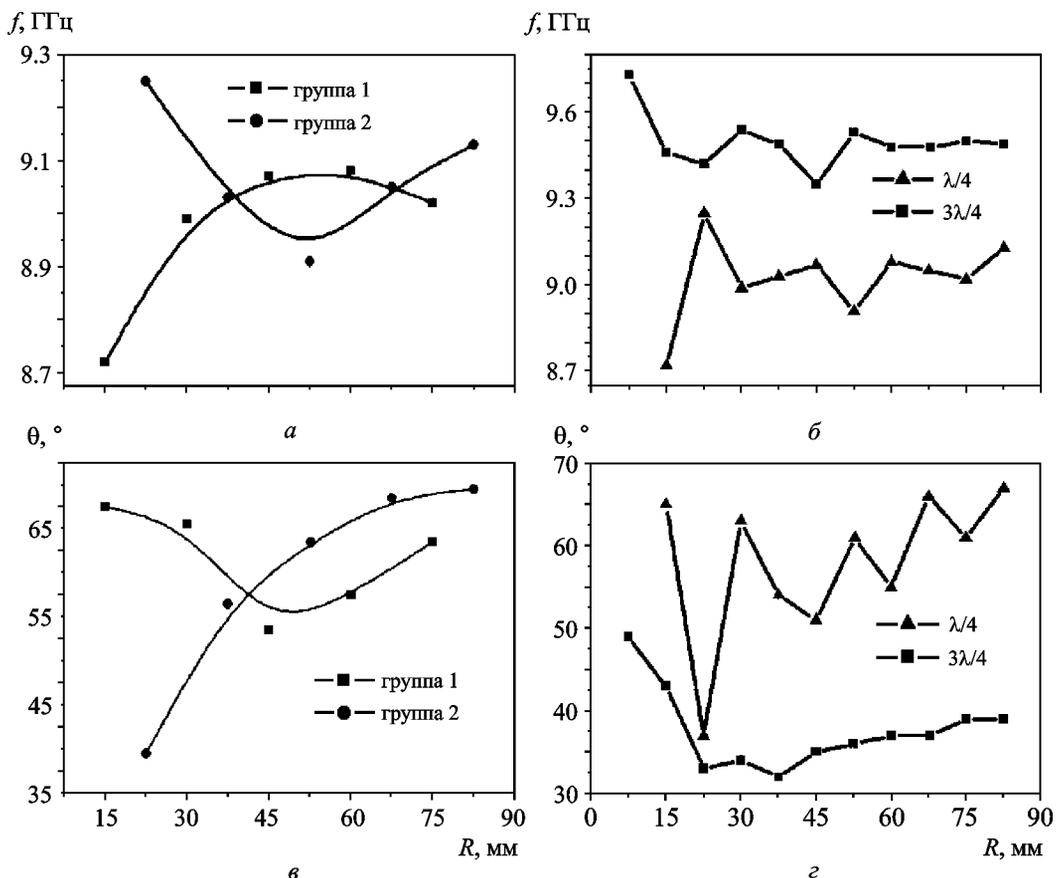


Рис. 3. Зависимости резонансных частот двух групп антенн (а), резонансных частот всех исследуемых антенн (б), углов максимального излучения двух групп антенн (в), углов максимального излучения всех исследуемых антенн (г) от радиуса экрана

Проведем сравнение пространственно-временных распределений ЭМ полей в волновой зоне антенн с высотами монополя $d_{r1} = \lambda/4$ и $d_{r1} = 3\lambda/4$ для одинакового радиуса экрана (рис. 4). Анализ представленных распределений показывает, что интенсивность поля на краю экрана антенны с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ в 5.7 раз выше (рис. 4, а), чем у антенны с высотой монополя $d_{r1} = 3\lambda/4$ (рис. 4, б), что и обуславливает отсутствие интенсивного излучения в “теневого” области антенны с высотой монополя $3\lambda/4$. Такое распределение ЭМ поля приводит к формированию однолепестковой ДН с направлением максимума излучения близким к зениту [11].

В отличие от антенн с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ зависимость изменения резонансной частоты от радиуса экрана для всех антенн с высотой монополя $d_{r1} = 3\lambda/4$ не является осциллирующей, а имеет минимум при $R = 37.5$ мм. При этом резонансная частота антенн с радиусами экрана $R > 75$ мм остается практически неизменной (рис. 3, б).

Проведенные исследования ДН антенн с высотой монополя $d_{r1} = 3\lambda/4$ [11] позволили установить зависимость изменения угла максимального излучения от радиуса экрана (рис. 3, в).

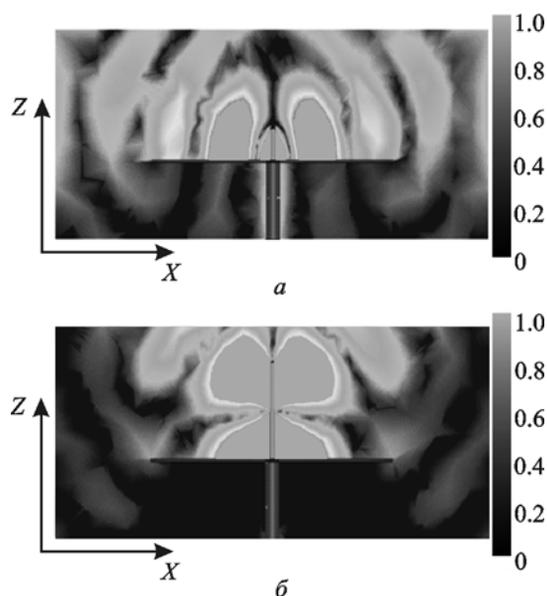


Рис. 4. Пространственное распределение модуля E компоненты ЭМ поля в фиксированный момент времени в ближней зоне антенн с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ (а) и $d_{r1} = 3\lambda/4$ (б)

Начиная со значения $R = 45$ мм, при последующем увеличении экрана угол максимального излучения антенн увеличивается и при $R = 75$ мм выходит на значение $\theta = 39^\circ$. Следует отметить, что в отличие от антенн с $d_{r1} = \lambda/4$, для которых изменение угла максимального излучения по мере увеличения радиуса экрана имеет осциллирующий характер, для антенн с $d_{r1} = 3\lambda/4$ угол максимального излучения изменяется плавно из-за меньшего влияния дифракционных эффектов на характеристики излучения данных антенн.

4. Диэлектрическая дисковая антенна

Для ДДА формирование ближнего поля антенны обусловлено дифракцией как на краях экрана и диэлектрической подложки, так и на краях диэлектрического диска. В этом случае интерференционная картина может иметь сложное пространственное распределение ЭМ поля, сохраняя при этом аксиальную симметрию. Дальнейший анализ характеристик ДДА при изменении радиуса экрана начнем с анализа ее частотных характеристик.

В случае антенны с минимальным радиусом подложки и экрана $R = 15$ мм мы наблюдаем один резонанс (рис. 5). По мере увеличения радиуса подложки антенна становится многочастотной. В этом случае пороговое значение радиуса подложки составляет $R = 45$ мм, так как на частотной зависимости параметра S_{11} (коэффициент обратных потерь) для данной антенны появляются низкодобротные резонансы в области как высоких, так и низких частот. При этом интенсивность основного резонанса уменьшается. В качестве примера на рис. 5 приведена частотная зависимость параметра S_{11} для антенн с $R = 97.5$ мм и $R = 110$ мм. Природа возникновения двух режимов работы ДДА становится понятной из рассмотрения пространственных распределений ЭМ полей в индуктивной зоне антенн.

ЭМ поля в индуктивной зоне антенн с радиусами подложки $R = 15$ мм и $R = 45$ мм на резонансных частотах имеют вид “пространственной волновой решетки” с максимумом в области края диска (рис. 6). Определим этот режим как режим “дискового резонатора”, при котором соблюдаются резонансные условия для

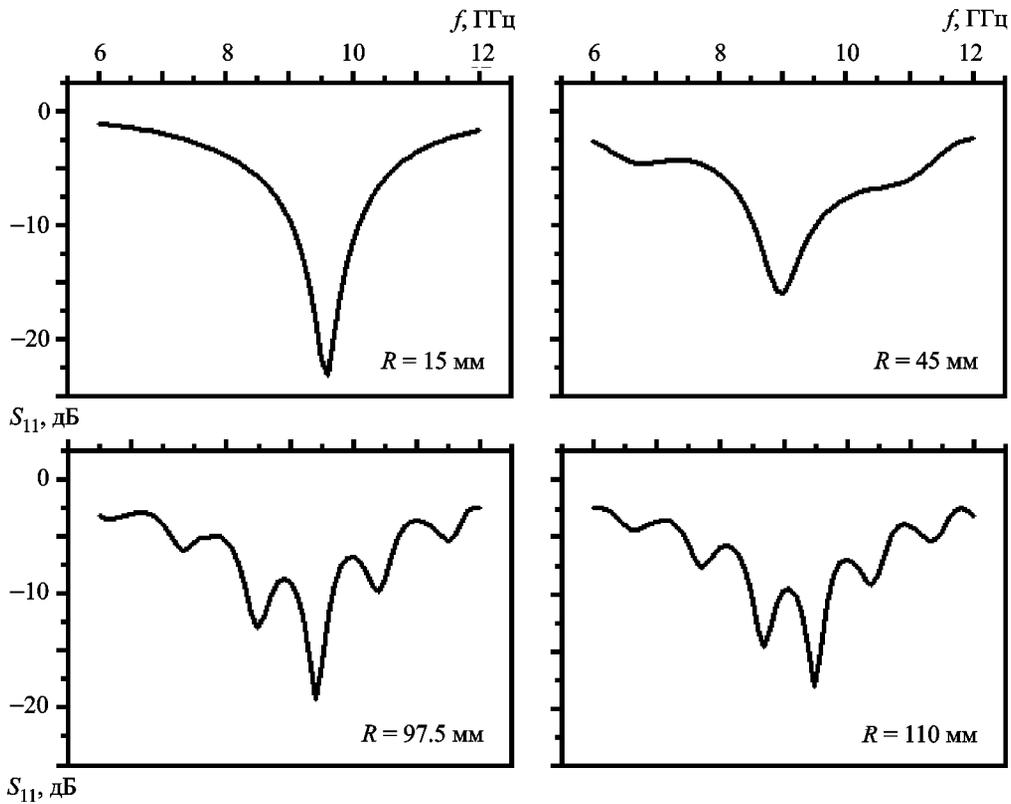


Рис. 5. Параметр S_{11} ДДА с радиусами экранов $R = 15$ мм, $R = 45$ мм, $R = 97.5$ мм, $R = 110$ мм

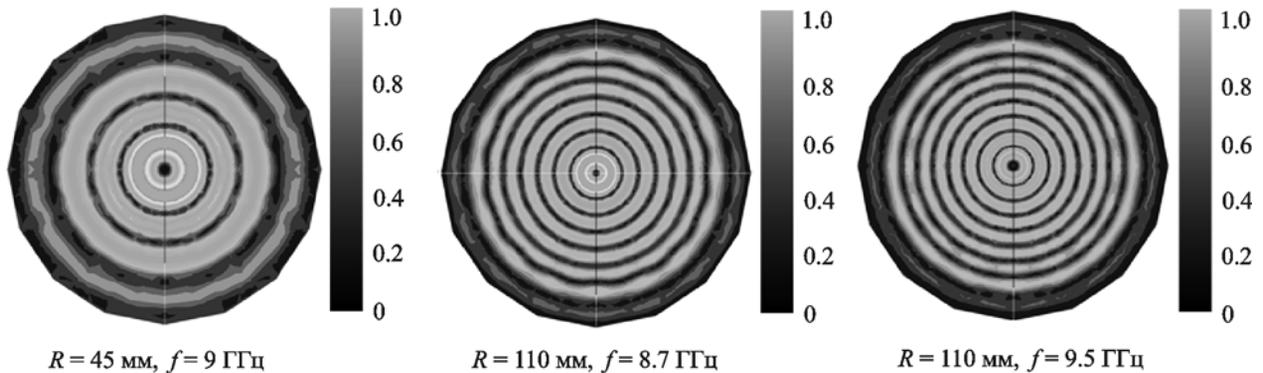


Рис. 6. Распределения H_{φ} компоненты ЭМ поля в индуктивной зоне антенн

ДДА [12]. При этом картины распределения ЭМ полей в ближней зоне антенн с радиусами подложки $R > 45$ мм позволяют однозначно утверждать, что резонансы, возбуждающиеся в данных антеннах, например на частоте $f = 8.7$ ГГц при $R = 110$ мм (см. рис. 6), также соответствуют режиму “дискового резонатора”. В то же время здесь наблюдаются распределения полей, соответствующие режиму “пространствен-

ной волновой решетки”, например на частоте $f = 9.5$ ГГц при $R = 110$ мм (см. рис. 6). Кроме того, необходимо отметить тот факт, что для рассматриваемого класса антенн сохраняется тенденция увеличения количества вариаций поля на одну с каждым переходом к более высокочастотному резонансу для всех многочастотных антенных структур, представленных в настоящей работе.

5. Выводы

Проведенное в работе исследование распределения ближних ЭМ полей цилиндрических монополярных антенн с высотой монополя $d_{r1} = \lambda/4$ при изменении радиуса экрана позволило объяснить природу осциллирующих зависимостей резонансной частоты и угла максимального излучения антенн. Для ДДА с высокой диэлектрической проницаемостью диска ($\epsilon_{rd} = 90$) и радиусах экрана $R > 45$ мм выделено два характерных режима работы: режим “дискового резонатора”, при котором максимум в распределении ЭМ поля сосредоточен в области диэлектрического диска, и режим “пространственной волновой решетки”, когда распределение ЭМ поля имеет вид кольцевой интерференционной картины с практически равной интенсивностью поля в областях конструктивной интерференции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cockrell C. and Pathak P. Diffraction Theory Techniques Applied to Aperture Antennas on Finite Circular and Square Ground Planes // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1974. – Vol. 22, No. 3. – P. 443–448.
2. Sharma S. K. and Shafai L. Beam Focusing Properties of Circular Monopole Array Antenna on a Finite Ground Plane // IEEE Trans. Antennas Propag. – 2005. – Vol. 53, No. 10. – P. 3406–3409.
3. Gyoda K. and Ohira T. Design of electronically steerable passive array radiator (ESPAR) antennas // IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. Vol. 2. – Salt Lake City (USA). – 2000. – P. 922–925.
4. Lier E. and Jakobsen K. Rectangular Microstrip Patch Antennas with Infinite and Finite Ground Plane Dimensions // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1983. – Vol. 31, No. 6. – P. 978–984.
5. Huang J. The Finite Ground Plane Effect on the Microstrip Antenna Radiation Patterns // IEEE Trans. Antennas Propag. – 1983. – Vol. 31, No. 4. – P. 649–653.
6. Laybros S., Combes P. F., and Mametsa H. J. The “Very Near - Field” Region of Equiphase Radiation Apertures // IEEE Antennas Propag. Mag. – 2005. – Vol. 47, No. 4. – P. 50–66.
7. Сиренко Ю. К. Моделирование и анализ переходных процессов в открытых периодических, волноводных и компактных резонаторах. Харьков: ЭДЭНА, 2003. – 363 с.
8. Сиренко Ю. К., Пазынин В. Л., Вязьмитинова А. И., Сиренко К. Ю. Компактные неоднородности свободного пространства: виртуальные границы в скалярных и векторных открытых начально-краевых задачах теории рассеяния несинусоидальных электромагнитных

волн // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2003. – Т. 8, № 11–12. – С. 33–54.

9. Ivancenko I. V., Korolev A. M., Lukyanova N. Y., and Popenko N. A. Broadband omnidirectional circular patch antenna // Pros. 17th International conference on applied electromagnetics and communications. – Dubrovnik (Croatia). – 2003. – P. 164–167.
10. Ivancenko I. V., Ivancenko D. I., Korolev A. M., Popenko N. A. Experimental Studies of X-band leaky-wave antenna performances // Microw. Opt. Tech. Lett. – 2002. – Vol. 35, No. 4. – P. 277–281.
11. Radionov S., Ivanchenko I., Khruslov M., Korolev A., and Popenko N. A New X - Band Mobile Direction Finder. In: I. Minin editor. Microwave and Millimeter Wave Technologies. – Vukovar: INTECH. – 2010. – P. 273–288.
12. Носич А. И., Близнюк Н. Ю. Численный анализ диэлектрической антенны // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. – 2000. – Т. 5, № 1. – С. 49–54.

I. V. Ivanchenko, H. O. Popenko, M. M. Khruslov

Інститут радіофізики та електроніки
ім. А. Я. Усикова НАН України,
вул. Ак. Проскури, 12, Харків, 61085, Україна

ДИФРАКЦІЙНІ ЕФЕКТИ У ЦИЛІНДРИЧНИХ МОНОПОЛЬНИХ І ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ДИСКОВИХ АНТЕНАХ

На підставі експериментальних досліджень та числового моделювання визначено вплив дифракційних ефектів на характеристики випромінювання циліндричних монополярних антен і діелектричних дискових антен зі змінною електродинамічними параметрами їх складових частин. Зокрема встановлено, що осцилюючі залежності кута максимального випромінювання та резонансної частоти монополярних циліндричних антен з монополем висотою $d_{r1} = \lambda/4$ від радіуса екрана пояснюються різною структурою розподілу електромагнітного поля в індуктивній зоні антен з радіусом екрана кратним $\lambda/2$ та кратним непарному числу $\lambda/4$ (λ – довжина хвилі у вільному просторі). Показано, що в індуктивній зоні досліджуваних антен формуються просторові розподіли електромагнітного поля у вигляді “просторової хвильової решітки”.

I. V. Ivanchenko, M. M. Khruslov, and N. A. Popenko

A. Usikov Institute of Radio Physics and Electronics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
12, Akad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

DIFFRACTION EFFECTS IN THE CYLINDRICAL MONOPOLE AND DIELECTRIC DISK ANTENNAS

Based on experimental studies and simulation modeling, the influence of diffraction effects on the radiation characteristics of cylindrical monopole antennas and dielectric disk antennas is determined under conditions when the electrodynamic parameters of antenna components are changed. In particular it is

established that the oscillating dependence of the angle of maximum radiation and the resonant frequency of monopole cylindrical antennas with the monopole height $d_{r1} = \lambda/4$ as function of the ground plane radius are explained by different spatial structure of electromagnetic field in the inductive region of antenna with the ground plane radius being multiple of $\lambda/2$ and

the odd number of times $\lambda/4$ (λ is the wavelength in free space). It is shown that the spatial distributions of electromagnetic fields as the "spatial wave grating" are formed in the inductive region of antennas under test.

Статья поступила в редакцию 19.01.2012