

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы
Modern radio engineering and telecommunication systems

УДК 537.8

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-56-67>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Моделирование электромагнитного поля излучающей апертуры

В.Н. Исаков[@],
В.С. Ланкина

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: isakov@mirea.ru

Резюме. Статья посвящена вопросам численного расчета характеристик электромагнитного поля излучающих апертур. Излучающая апертура является универсальной электродинамической моделью, используемой при анализе специального класса антенн, в частности зеркальных и рупорных; исследовании явлений дифракции; планировании трасс распространения радиоволн; решении задач беспроводной передачи электрической энергии на расстояние. В соответствии с нуждами практики наибольший интерес представляет структура электромагнитного поля излучающей апертуры в промежуточной и дальней зонах. Однако теоретические решения соответствующих задач получить, как правило, затруднительно, за исключением некоторых частных случаев, относящихся к дальней зоне, что обуславливает разработку соответствующих вычислительных моделей. Цель статьи – обобщение и систематизация опыта разработки программного обеспечения для моделирования характеристик электромагнитного поля излучающих апертур в промежуточной и дальней зонах. В статье рассматривается подход к разработке вычислительной модели излучающей апертуры, позволяющей рассчитывать характеристики электромагнитного поля в промежуточной и дальней зонах, приводятся примеры получаемых результатов для случая круглой и кольцевой апертур, характеризующие структуру их электромагнитного поля. Даются примеры облетных диаграмм круглой апертуры. Продемонстрирован эффект «прожекторной» локализации электромагнитного поля в промежуточной зоне круглой излучающей апертуры и эффект взаимной компенсации соседних зон Френеля с использованием модели кольцевой излучающей апертуры. Разработана программа на языке C++ для расчета характеристик электромагнитного поля излучающих апертур в промежуточной и дальней зонах. Результаты работы могут быть использованы в качестве иллюстрационного материала при преподавании учебных дисциплин «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Устройства СВЧ и антенны».

Ключевые слова: апертура, излучающий раскрыв, антенна, вычислительные методы, локализация электромагнитного поля

• Поступила: 15.03.2020 • Доработана: 18.04.2021 • Принята к опубликованию: 25.05.2021

Для цитирования: Исаков В.Н., Ланкина В.С. Моделирование электромагнитного поля излучающей апертуры. *Российский технологический журнал*. 2021;9(4):56–67. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-56-67>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Modeling of the electromagnetic field of radiating aperture

Vladimir N. Isakov[@],
Viktorii S. Lankina

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: isakov@mirea.ru

Abstract. The article is devoted to the issues of numerical calculation of the characteristics of the electromagnetic field of radiating apertures. The radiating aperture is a universal electrodynamic model used in the analysis of a special class of antennas, in particular, mirror and horn antennas, in the study of diffraction phenomena, in the planning of radio wave propagation paths, and when solving problems of wireless transmission of electric energy at a distance. The structure of the electromagnetic field of a radiating aperture in the intermediate and far zones is of the greatest interest according to the needs of practice. However, the theoretical solutions of these problems are usually difficult to obtain, except for some special cases related to the far zone. This leads to the development of appropriate computational models. This paper is aimed at generalization and systematization of experience in developing software for the simulation of electromagnetic field characteristics of radiating apertures in the intermediate and far zones. This paper considers an approach to developing a computational model of a radiating aperture that may be used to calculate the characteristics of electromagnetic field in the intermediate and far zones. Examples of results obtained for circular and ring apertures describing the structure of their electromagnetic field are given. Examples of flight diagrams of a circular aperture are given. The effect of “searchlight” localization of the electromagnetic field in the intermediate zone of a circular emitting aperture is demonstrated. The effect of mutual compensation of neighbouring Fresnel zones using the circular emitting aperture model is demonstrated. A program was developed for calculating the characteristics of the electromagnetic field of radiating holes in the intermediate and far zones. The results can also be used as illustration material for teaching the academic disciplines “Electrodynamics and radio wave propagation” and “Microwave devices and antennas”.

Keywords: emitting aperture, antenna, computational methods, localization of the electromagnetic field

• Submitted: 15.03.2020 • Revised: 18.04.2021 • Accepted: 25.05.2021

For citation: Isakov V.N., Lankina V.S. Modeling of the electromagnetic field of radiating aperture. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(4):56–67 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-56-67>

Financial disclosure: Authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Излучающая апертура является универсальной электродинамической моделью, традиционно рассматриваемой при решении задач анализа антенн, излучающих с поверхности раскрыва, задач дифракции электромагнитных волн на экране; при планировании трасс распространения радиоволн.

До недавнего времени структура и характеристики электромагнитного поля излучающей апертуры чаще всего рассматривались в дальней зоне, что связано с практической потребностью анализа характеристик антенн [1–10]. Однако в последние

годы интенсивно решаются задачи передачи энергии с использованием электромагнитных волн [11].

Бесконтактная передача энергии является приоритетной народно-хозяйственной задачей. Необходимым свойством возбуждаемого для бесконтактной передачи энергии электромагнитного поля является его локализация в ограниченном объеме пространства. Указанным свойством обладает электромагнитное поле излучающей апертуры при определенных условиях, что и обуславливает актуальность данной работы.

Цель статьи – обобщение и систематизация опыта разработки программного обеспечения для

моделирования характеристик электромагнитного поля излучающих апертур в промежуточной и дальней зонах.

Нельзя не отметить, что работы в рамках заявленной тематики уже существуют. Моделирование электромагнитного поля прямоугольной апертуры выполнено еще в [12] для обеспечения изучения материала по анализу дифракции Френеля. Применительно к вопросам практики подобные результаты для прямоугольной апертуры развиты в [13–15]. Однако работы [12–15] ограничиваются лишь представлением результатов моделирования, оставляя в стороне вопросы реализации и особенности подхода к самому моделированию, что исключает возможность развития идей, совершенствования вычислительных процедур, разработки аналогичных программ для исследования неплоских апертур с различными амплитудными и фазовыми распределениями. Вместе с тем, работы [1–3] уделяют должное внимание вопросам формализации алгоритмов моделирования, но исходят из потребности анализа поля в дальней зоне или нахождения эквивалентного импеданса раскрыва. Авторы предполагают, что данная статья восполнит указанный пробел в рамках заявленной тематики. Наличие большого количества примеров в указанных источниках для прямоугольных апертур позволяет нам не дублировать эти результаты, отдавая предпочтение моделированию круговых и кольцевых апертур.

Результаты, получаемые в области рассматриваемых явлений, могут быть использованы не только в рамках исследований, но и для обогащения иллюстрационным материалом учебного процесса в рамках преподавания дисциплин «Электродинамика и распространение радиоволн» и «Устройства СВЧ и антенны».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Под плоской излучающей апертурой будем понимать фрагмент S плоскости Π , на котором задано распределение тангенциальных составляющих векторов напряженности электрического и магнитного поля. Для примера на рис. 1 в качестве поверхности Π рассматривается плоскость xOy .

Тангенциальные составляющие характеристик поля на поверхности Π заданы следующим образом:

$$\left. \dot{\vec{E}}_m \right|_S = \vec{x}^0 \dot{E}_0(x, y), \left. \dot{\vec{H}}_m \right|_S = \vec{y}^0 \frac{1}{W} \dot{E}_0(x, y), \quad (1)$$

$$\text{где } \dot{E}_0(x, y) = \begin{cases} E_0(x, y) e^{j\varphi_{E_0}(x, y)}, & (x, y) \in S \\ 0, & (x, y) \notin S. \end{cases}$$

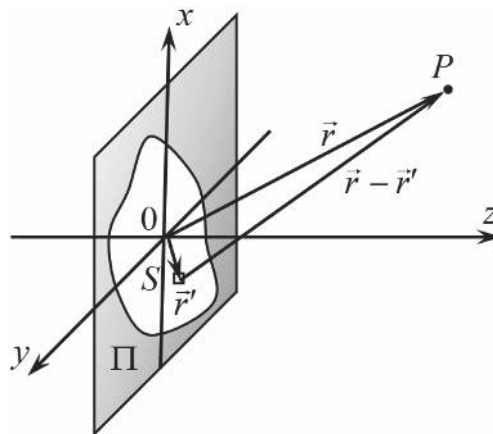


Рис. 1. Излучающая апертура

В соответствии с принципом эквивалентности эквивалентные токи можно записать в виде:

$$\dot{\vec{J}}_m^M = - \left[\vec{z}^0, \dot{\vec{E}}_m \right]_S = - \left[\vec{z}^0, \vec{x}^0 \right]_S \dot{E}_0 = - \vec{y}^0 \dot{E}_0,$$

$$\dot{\vec{J}}_m^E = \left[\vec{z}^0, \dot{\vec{H}}_m \right]_S = \left[\vec{z}^0, \vec{y}^0 \right]_S \frac{1}{W} \dot{E}_0 = - \vec{x}^0 \frac{1}{W} \dot{E}_0.$$

Поскольку в каждой точке апертуры имеются скрещенные электрический и магнитный поверхностные токи, то сама апертура может быть представлена совокупностью элементов Гюйгенса размером $l_e \times l_h$, где l_e – размер вдоль вектора напряженности электрического поля, l_h – размер вдоль вектора напряженности магнитного поля. Положение каждого элемента Гюйгенса характеризуется радиус-вектором \vec{r}' и вектором нормали к поверхности \vec{n}^0 (ориентационным вектором).

В строгой постановке задачи разбиение апертуры на элементы Гюйгенса предполагается непрерывным, а сами элементы – бесконечно малыми. Однако в рамках строгого подхода получение решений рассматриваемой задачи в общем случае затруднительно, поэтому в дальнейшем рассматриваются конечно-элементные разбиения апертуры, при этом $l_{e,h} \ll \lambda$, где λ – длина волны.

Таким образом, в точке расположения каждого элемента Гюйгенса формально имеется элементарный электрический излучатель с длиной l_e и током $\dot{I}_m^E = \frac{\dot{E}_0}{W} l_h$, а также элементарный магнитный излучатель с длиной l_h и током $\dot{I}_m^M = \dot{E}_0 l_e$.

Характеристики электромагнитного поля в некоторой точке P , характеризуемой радиус-вектором \vec{r} , на основе принципа суперпозиции могут быть определены как векторные суммы соответствующих характеристик полей, создаваемых каждым элементарным излучателем:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_m &= \sum_{n_e=0}^{N_e-1} \sum_{n_h=0}^{N_h-1} \left(\dot{\vec{E}}_{m,n_e,n_h}^{\text{Э}} + \dot{\vec{E}}_{m,n_e,n_h}^{\text{М}} \right), \\ \dot{\vec{H}}_m &= \sum_{n_e=0}^{N_e-1} \sum_{n_h=0}^{N_h-1} \left(\dot{\vec{H}}_{m,n_e,n_h}^{\text{Э}} + \dot{\vec{H}}_{m,n_e,n_h}^{\text{М}} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где N_e – количество элементов Гюйгенса, укладываемых на S вдоль направления вектора напряженности электрического поля; N_h – количество элементов Гюйгенса, укладываемых на S вдоль направления вектора напряженности магнитного поля; (n_e, n_h) – совокупный номер элемента Гюйгенса на S ; $\dot{\vec{E}}_{m,n_e,n_h}^{\text{Э}}, \dot{\vec{H}}_{m,n_e,n_h}^{\text{Э}}$ – характеристики электромагнитного поля, создаваемые элементарным электрическим излучателем, ориентированным вдоль вектора напряженности электрического поля на апертуре, длиной l_e и током $\dot{I}_m^{\text{Э}} = \frac{\dot{E}_0}{\dot{W}} l_h$, положение которого задается вектором положения элемента Гюйгенса, соответствующего номеру (n_e, n_h) ; $\dot{\vec{E}}_{m,n_e,n_h}^{\text{М}}, \dot{\vec{H}}_{m,n_e,n_h}^{\text{М}}$ – характеристики электромагнитного поля, создаваемые элементарным магнитным излучателем, ориентированным вдоль вектора напряженности магнитного поля на апертуре, длиной l_h и током $\dot{I}_m^{\text{М}} = \dot{E}_0 l_e$, положение которого задается вектором положения элемента Гюйгенса с номером (n_e, n_h) .

В задаче требуется, исходя из заданных условий (1), найти характеристики электромагнитного поля (2).

ПОДХОД К ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧАЮЩИХ АПЕРТУР

Электродинамические расчеты характеризуются повышенной сложностью; вычисления являются комплексными и векторными; для описания процессов применяются различные системы координат, в рамках нашей работы – чаще всего декартова и сферическая. Обеспечение этих расчетов само по себе является трудоемкой задачей: разработка программы для электродинамических расчетов – это сложный творческий процесс, что обуславливает необходимость его разбиения на несколько этапов, на каждом из которых решается та или иная подзадача, а сама программа разрабатывается как совокупность модулей.

Для обеспечения векторных вычислений разработан отдельный модуль, особенностью которого является реализация операций с комплексными векторами.

Вычислительные функции модуля векторных вычислений используются модулем моделирования элементарного электрического излучателя, модулем моделирования элементарного магнитного излучателя, модулем моделирования элемента Гюйгенса и, наконец, самой апертуры. Модуль моделирования

апертуры является вычислительным модулем верхней иерархии и непосредственно используется модулем управления и интерфейса.

Модуль управления и интерфейса обеспечивает непосредственное взаимодействие с пользователем, интерпретирует команды пользователя по конфигурированию апертуры и представляет результаты расчетов.

Характеристики электромагнитного поля элементарного электрического излучателя определяются известными выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_m^{\text{Э}} &= \dot{p}_m^{\text{Э.ст}} jk \dot{W} \left(\vec{r}^0 \frac{2}{kr} \left(j + \frac{1}{kr} \right) (\vec{r}^0, \vec{p}^0) + \right. \\ &+ \left. (\vec{r}^0 (\vec{r}^0, \vec{p}^0) - \vec{p}^0) \left(1 - j \frac{1}{kr} - \frac{1}{(kr)^2} \right) \right) G(r), \quad (3) \\ \dot{\vec{H}}_m^{\text{Э}} &= [\vec{p}^0, \vec{r}^0] \dot{p}_m^{\text{Э.ст}} k \left(j + \frac{1}{kr} \right) G(r), \end{aligned}$$

где $\dot{p}_m^{\text{Э.ст}} = \dot{I}_m^{\text{Э}} l_e = \frac{\dot{E}_0}{\dot{W}} l_h l_e$ – момент тока элементарного электрического излучателя; \dot{W} – волновое сопротивление; k – волновое число; \vec{p}^0 – ориентационный вектор; $r = |\vec{r} - \vec{r}'|$; $G(r) = \frac{1}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r}$ – функция Грина; \vec{r}' – вектор положения.

Записанные выражения дают следующую программную модель: элементарный электрический излучатель характеризуется комплексной амплитудой тока \dot{I}_m , длиной l_e , ориентационным вектором \vec{p}^0 , радиус-вектором положения \vec{r}' . Указанные векторы задаются в декартовом базисе глобальной системы координат. Для расчета поля элементарного электрического излучателя по известным координатам исследуемой точки пространства в глобальной системе находится ее радиус-вектор, затем ее радиус-вектор в собственной (локальной) системе координат элементарного электрического излучателя $\vec{r} - \vec{r}'$, а затем рассчитываются векторы напряженности электрического и магнитного поля в соответствии с (3).

Характеристики электромагнитного поля элементарного магнитного излучателя находятся как

$$\begin{aligned} \dot{\vec{E}}_m^{\text{М}} &= -[\vec{p}^0, \vec{r}^0] \dot{p}_m^{\text{М.ст}} k \left(j + \frac{1}{kr} \right) G(r), \\ \dot{\vec{H}}_m^{\text{М}} &= \dot{p}_m^{\text{М.ст}} \frac{jk}{\dot{W}} \left(\vec{r}^0 \frac{2}{kr} \left(j + \frac{1}{kr} \right) (\vec{r}^0, \vec{p}^0) + \right. \\ &+ \left. (\vec{r}^0 (\vec{r}^0, \vec{p}^0) - \vec{p}^0) \left(1 - j \frac{1}{kr} - \frac{1}{(kr)^2} \right) \right) G(r), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\dot{p}_m^{\text{М.ст}} = \dot{I}_m^{\text{М}} l_h = \dot{E}_0 l_e l_h$ – момент элементарного магнитного излучателя.

Электромагнитное поле элемента Гюйгенса рассчитывается как векторная сумма полей скрещенных элементарного электрического и элементарного магнитного излучателей.

При инициализации элемента Гюйгенса задаются его длина вдоль вектора напряженности электрического поля l_e и вдоль вектора напряженности магнитного поля l_h , вектор напряженности электрического поля \vec{E}_0 и вектор нормали к плоскости элемента Гюйгенса \vec{n}^0 (ориентационный вектор), а также вектор положения \vec{r}^0 . Далее вектор положения задается в качестве векторов положения для элементарного электрического и элементарного магнитного излучателей.

В точке расположения элемента Гюйгенса имеется элементарный электрический излучатель с длиной l_e и током $\vec{I}_m^e = \frac{\dot{E}_0}{W} l_h$, а также элементарный магнитный излучатель с длиной l_h и током $\vec{I}_m^m = \dot{E}_0 l_e$. Ориентация элементарного электрического излучателя определяется направлением задаваемого вектора напряженности электрического поля \vec{E}_0 , ориентация элементарного магнитного излучателя определяется направлением векторного произведения $[\vec{n}^0, \dot{E}_0]$.

Прямоугольная апертура представляется как совокупность элементов Гюйгенса, а ее электромагнитное поле – как суперпозиция полей этих элементов.

При инициализации апертуры считается, что вектор напряженности электрического поля \vec{E}_0 ориентирован вдоль оси x , задаются длина апертуры вдоль этого вектора L_x , длина апертуры вдоль вектора напряженности магнитного поля L_y , а также количество элементов Гюйгенса вдоль координатных осей N_x и N_y . Апертура считается расположенной так, что ее центр, определяемый центром срединного элемента Гюйгенса, соответствует началу системы координат, а сама она лежит в плоскости xOy . Для выполнения этого условия $N_{x,y}$ должны быть нечетными числами. В программе на языке C++ прямоугольную апертуру удобно представлять двумерным массивом объектов класса «элемент Гюйгенса».

Для получения кольцевой апертуры сначала создается квадратная, в которую может быть вписан внешний контур кольца, затем выключаются элементы Гюйгенса, центры которых попадают внутрь области затенения или размещаются вне внешнего контура кольца. При инициализации кольцевой апертуры считается, что вектор напряженности электрического поля \vec{E}_0 ориентирован вдоль оси x , задаются внешний и внутренний диаметры кольцевой апертуры D и d , а также количество элементов Гюйгенса вдоль внешнего диаметра N_D . Апертура считается расположенной так, что ее центр, определяемый центром срединного элемента Гюйгенса, соответствует началу системы координат, а сама она лежит в плоскости xOy . Для выполнения этого условия N_D должно быть нечетным. Задание $d = 0$ соответствует круглой апертуре.

В разработанной авторами программе пользователем задаются частота или длина волны, размеры апертуры вдоль координатных осей, выбирается схема дискретизации заданной апертуры, при этом сразу рассчитываются и выводятся размеры элементов апертуры, что дает возможность убедиться, что размеры элементов гораздо меньше длины волны, то есть, обеспечена корректность расчетов.

В качестве результата работы программа представляет облетные диаграммы в плоскостях xOz и yOz . Облетная диаграмма представляет собой зависимость нормированной амплитуды характеристики электромагнитного поля от положения точки пространства на окружности выбранного радиуса (радиуса облета), характеризуемого углом, отсчитываемым от плоскости апертуры, в выбранной плоскости (рис. 3). Облетные диаграммы строятся в полярных координатах, однако имеется возможность их наблюдения и в декартовых координатах. На облетных диаграммах показываются 4 кривые, соответствующие амплитудам радиальной, азимутальной, меридиональной составляющих, а также результирующей амплитуде вектора напряженности электрического поля. Нормировка ведется на максимум результирующей амплитуды.

В зависимости от задаваемого пользователем радиуса облета облетная диаграмма может соответствовать промежуточной или дальней зоне апертуры.

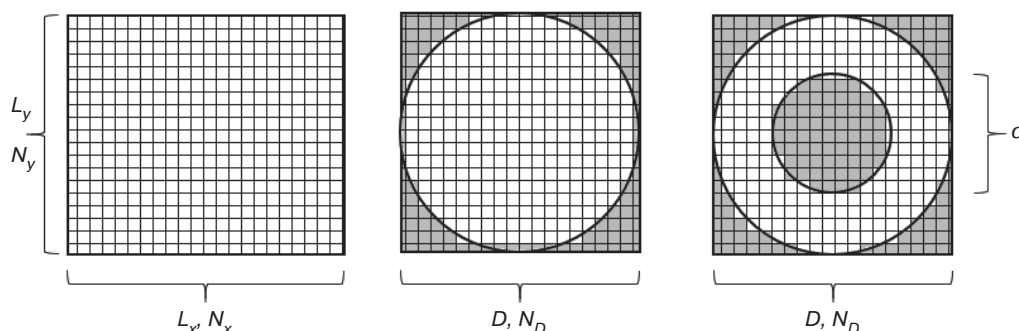


Рис. 2. Прямоугольная, круглая и кольцевая апертуры и их разбиения на элементы Гюйгенса

Облетная диаграмма в дальней зоне является диаграммой направленности.

Вторым результатом, представляемым программой, является амплитудный профиль вектора напряженности электрического поля – это зависимость амплитуды составляющей или самого вектора напряженности электрического поля в точке пространства от ее положения на прямой, параллельной плоскости апертуры и ориентированной в направлении, характеризуемом заданным углом, отсчитываемым от оси абсцисс (рис. 4). Угол поворота профильной прямой задается пользователем. Амплитудный профиль поля является ненормированной характеристикой.

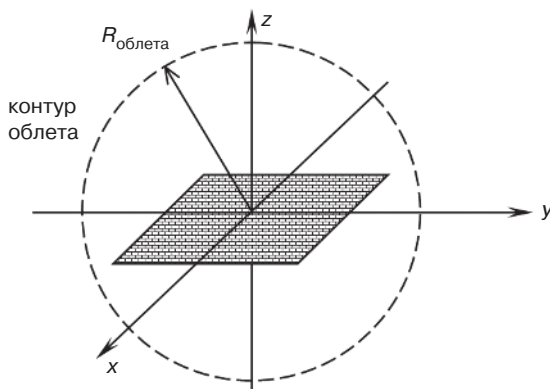


Рис. 3. Контур облета в плоскости yOz

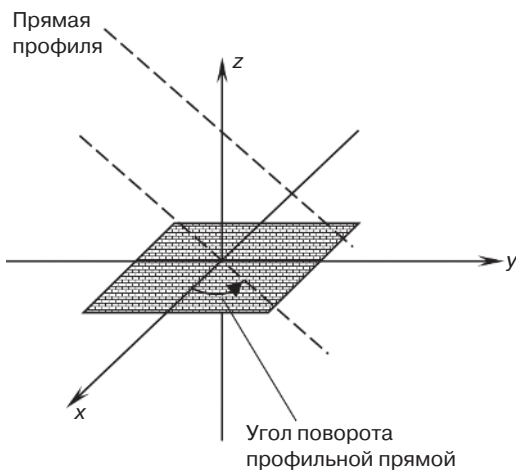


Рис. 4. Опорная прямая амплитудного профиля

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ И ИХ АНАЛИЗ

Примеры облетных диаграмм круглой излучающей апертуры показаны на рис. 5. Сама апертура лежит в плоскости xOy , вектор напряженности электрического поля направлен вдоль оси абсцисс. Левые рисунки соответствуют диаграммам в плоскости xOz , правые – в плоскости yOz . Синим цветом показана диаграмма для меридиональной составляющей, красным – для радиальной

составляющей, зеленым – для азимутальной составляющей вектора напряженности электрического поля. Черным цветом показана диаграмма для самого вектора напряженности электрического поля. Диаграммы соответствуют принципу излучения на бесконечности: по мере удаления от излучателя радиальная составляющая затухает, а волна становится сферической, что соответствует переходу в дальнюю зону. При этом облетная диаграмма переходит в диаграмму направленности.

Рис. 6 содержит результаты моделирования круглой апертуры, диаметр которой гораздо больше длины волны $D = 1$ м; $\lambda = 1$ см; $D / \lambda = 100$. Отношение диаметра апертуры к длине волны имеет смысл относительного диаметра апертуры. На рисунке приведены амплитудные профили характеристик электромагнитного поля вдоль оси абсцисс на различных расстояниях от плоскости апертуры. В промежуточной зоне, когда наблюдается красный профиль, соответствующий радиальной составляющей, приближенно можно считать, что электромагнитное поле локализовано в цилиндрическом объеме («волновой трубке»), диаметр которого равен диаметру апертуры. При увеличении расстояния от апертуры до опорной линии амплитудный профиль начинает «размазываться», а радиальная составляющая вектора напряженности электрического поля становится пренебрежимо малой по сравнению с меридиональной или азимутальной составляющими. Размазывание профиля, таким образом, имеет место уже в промежуточной зоне.

На рис. 7 зафиксирована длина волны $\lambda = 10$ см и расстояние до опорной линии профиля $z = 10$ м, а графики соответствуют постепенному увеличению диаметра апертуры на величину, соответствующую добавлению одной зоны Френеля. Последовательность рисунков показывает, что «пржекторный» эффект оказывается тем ярче выражен, чем больше зон Френеля открыто. Примерно начиная с десятой зоны Френеля ширина профиля по уровню 0.5 становится равной диаметру апертуры (при единичной амплитуде напряженности электрического поля на апертуре). В более общем случае можно задать номер зоны Френеля n_0 , начиная с которого имеет место локализация поля, тогда диаметр апертуры должен совпадать с диаметром этой зоны, то есть можем записать

$$D = 2\sqrt{n_0 L \lambda}, \quad (5)$$

откуда длина «волновой трубки»

$$L = \frac{D^2}{4n_0 \lambda}. \quad (6)$$

Или, поделив левую и правую часть (6) на длину волны, запишем

$$\frac{L}{\lambda} = \frac{1}{4n_0} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2. \quad (7)$$

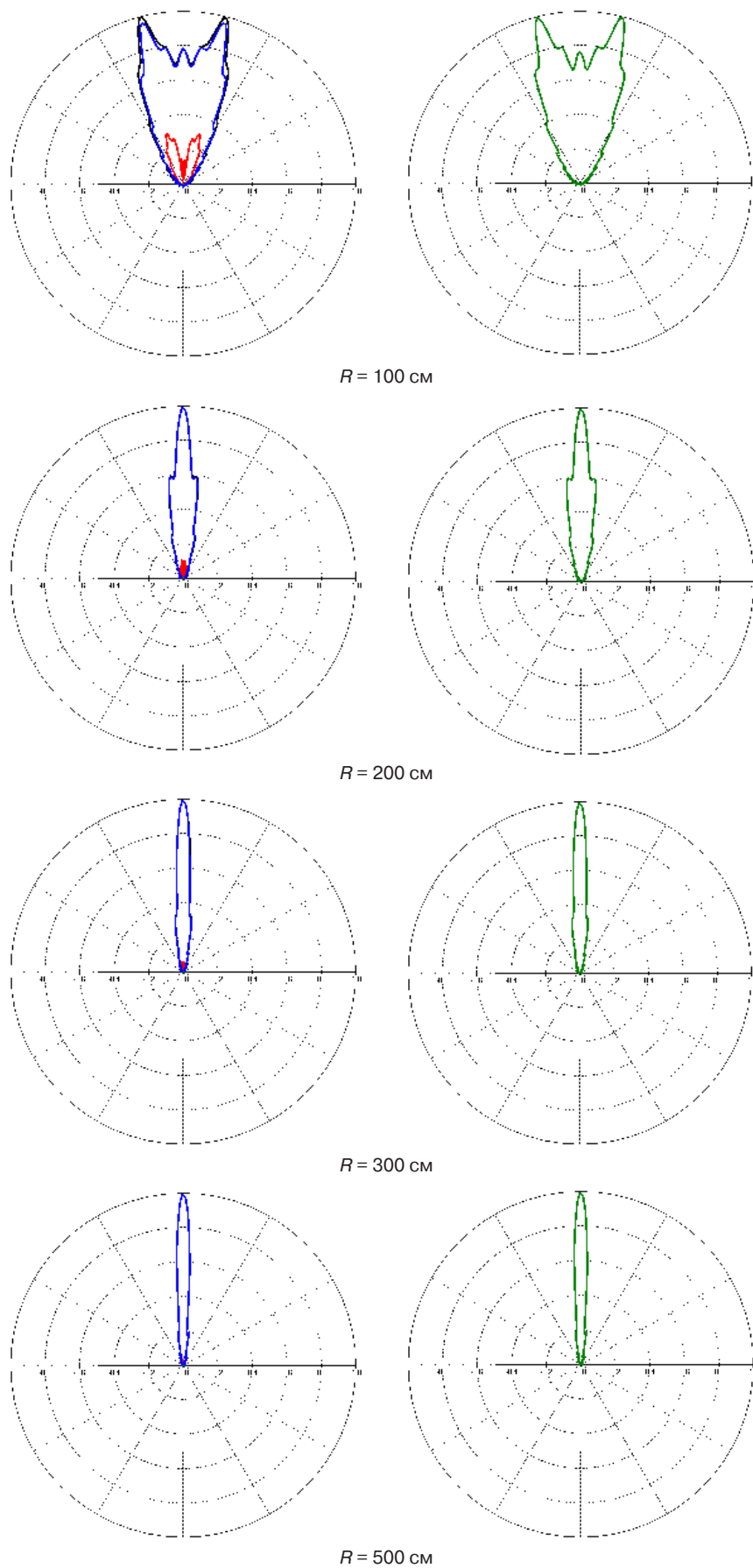


Рис. 5. Облетные диаграммы круглой апертуры (диаметр $D = 1$ м, длина волны $\lambda = 10$ см) при различных радиусах облета R

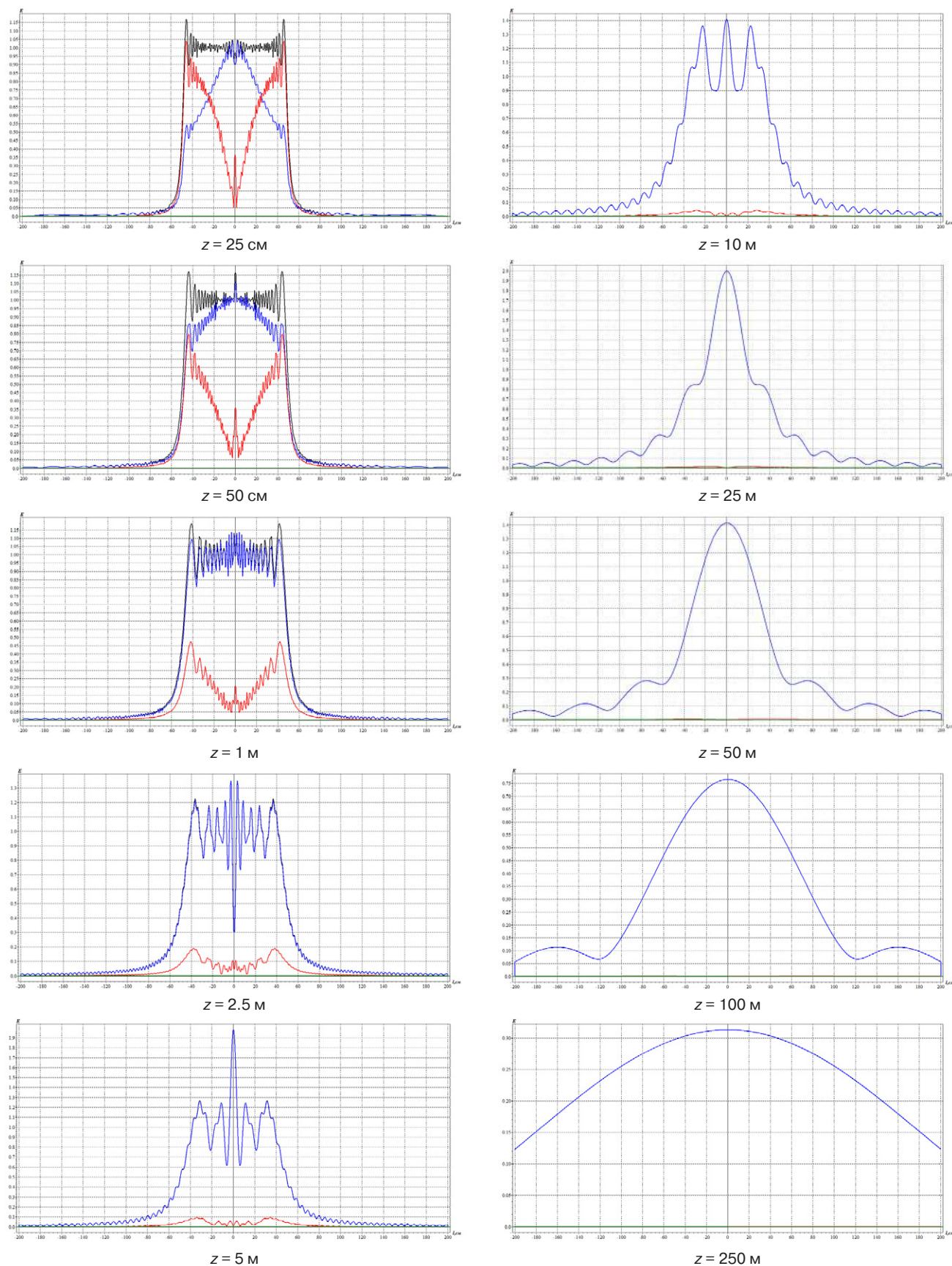


Рис. 6. Амплитудный профиль электромагнитного поля круглой апертуры (диаметр $D = 1$ м, длина волны $\lambda = 1$ см) вдоль вектора напряженности электрического поля на различных расстояниях z

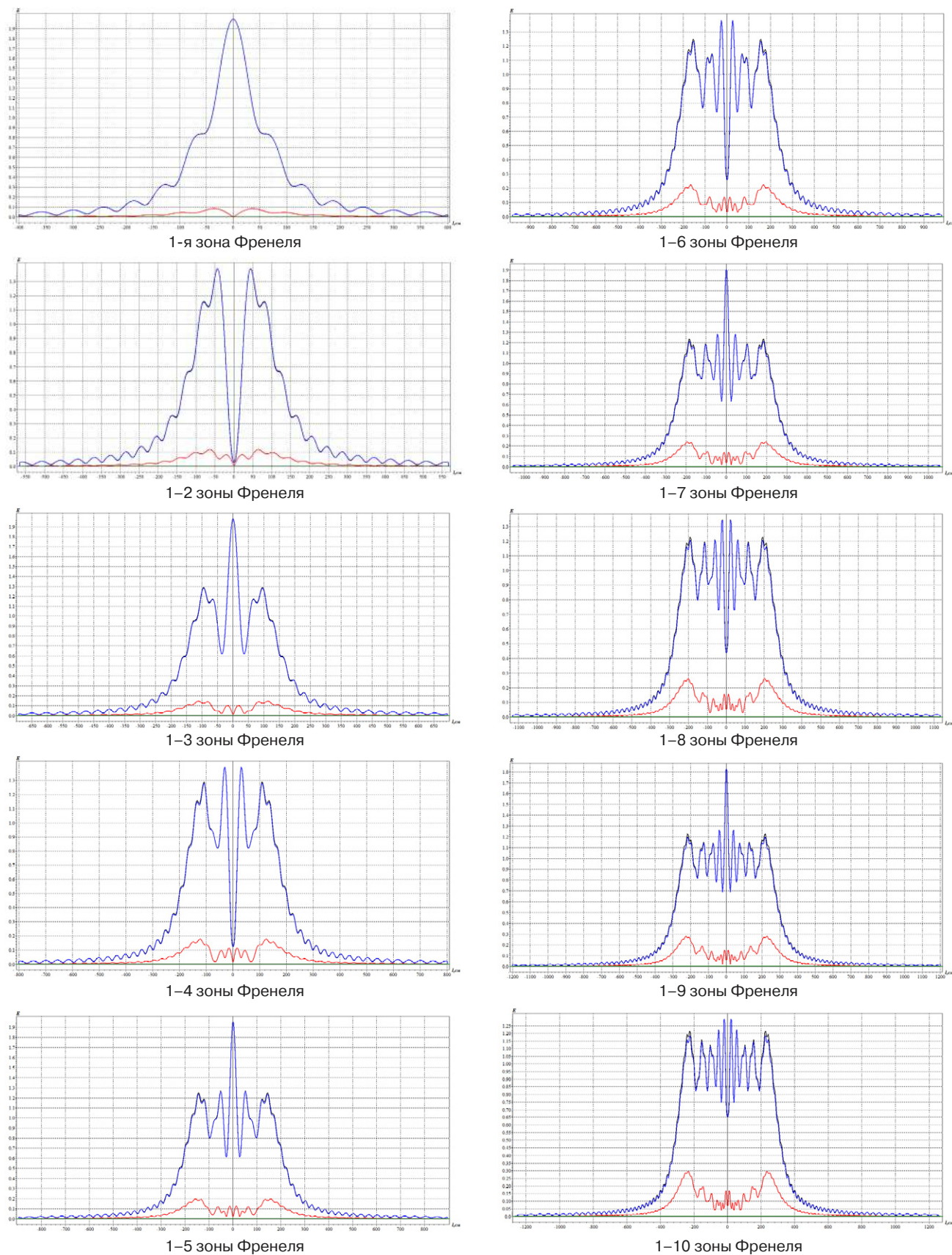


Рис. 7. Амплитудный профиль электромагнитного поля круглых апертур, соответствующих последовательному добавлению зон Френеля вдоль вектора напряженности электрического поля (длина волны $\lambda = 10$ см, $z = 10$ м)

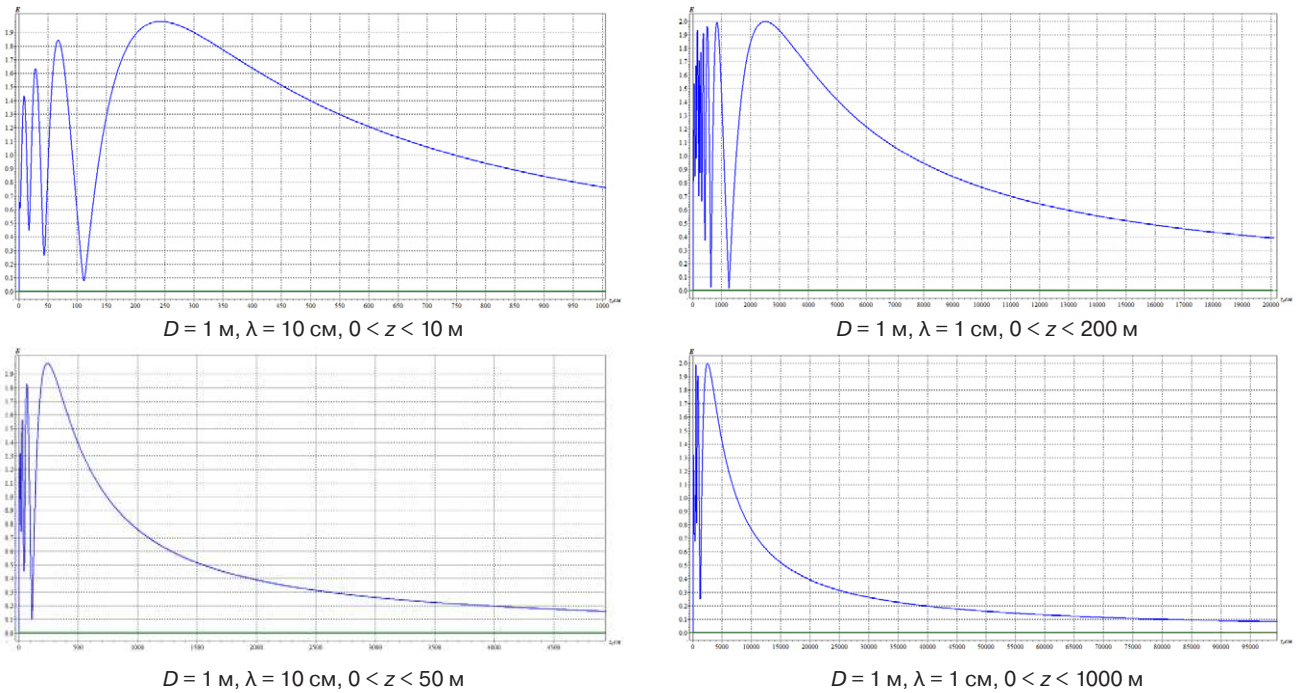


Рис. 8. Продольные амплитудные профили малой и большой круглых апертур

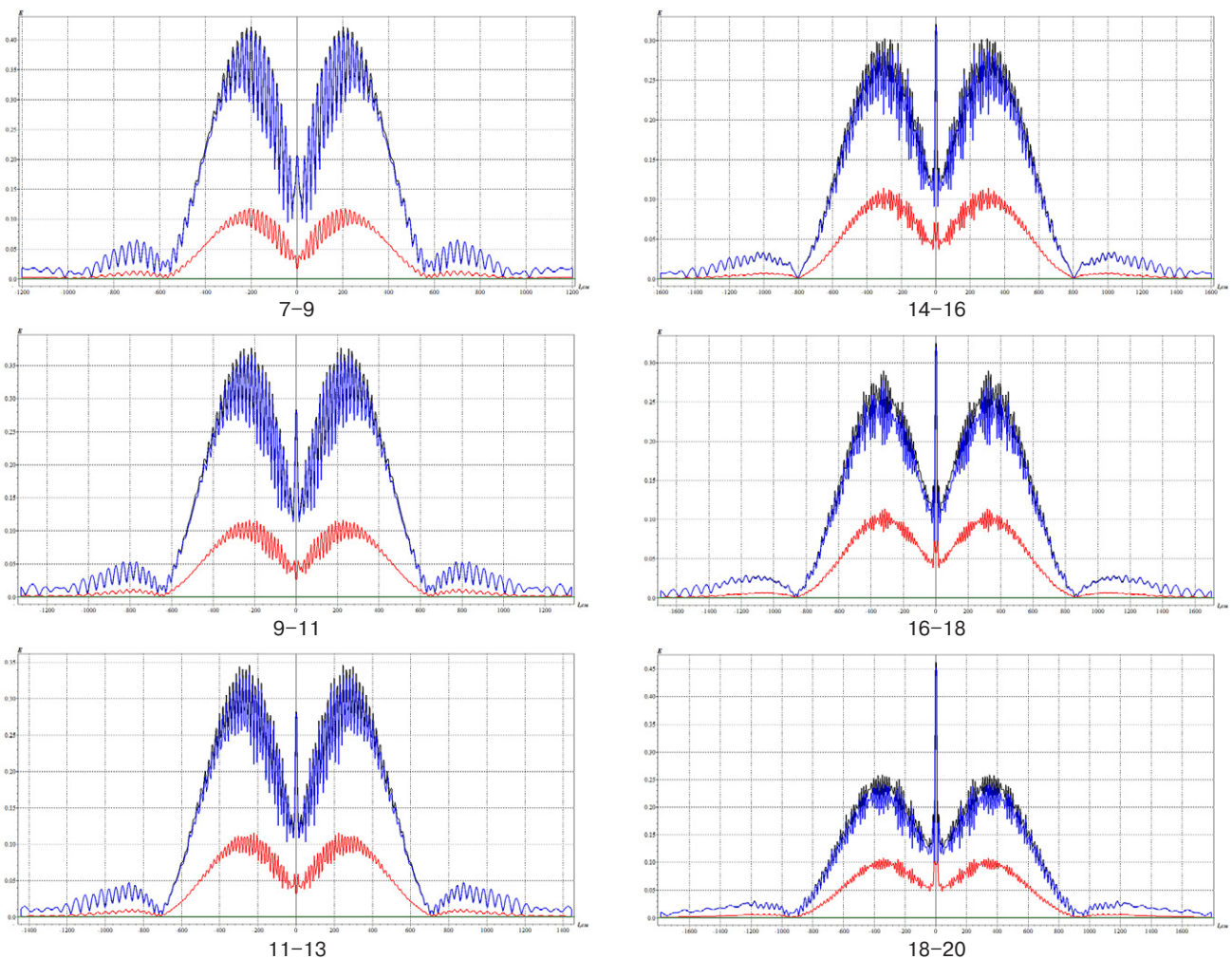


Рис. 9. Амплитудный профиль электромагнитного поля кольцевой апертуры, соответствующей двум соседним зонам Френеля вдоль вектора напряженности электрического поля (длина волны $\lambda = 10 \text{ см}$, $z = 10 \text{ м}$, номера зон указаны под графиком)

Записанное выражение показывает, что относительная длина волновой трубки L/λ прямо пропорциональна квадрату относительного диаметра апертуры, причем коэффициент пропорциональности не превосходит 0.25 и зависит от выбора номера зоны Френеля, которая должна уложиться на апертуре при ее наблюдении с расстояния $z \leq L$.

Выбор n_0 может осуществляться и исходя из анализа продольного амплитудного профиля электромагнитного поля над центром апертуры. В качестве примера на рис. 8 показаны результаты расчета продольного профиля для малой ($D/\lambda = 10$) и большой ($D/\lambda = 100$) круглых апертур. Координаты локальных экстремумов продольного амплитудного профиля (рис. 8) примерно соответствуют тем аппликатам, при наблюдении апертуры из которых она представляется как совокупность некоторого количества полных зон Френеля.

В общем, профили имеют характерные пульсации при увеличении продольной координаты до того момента, когда наблюдаемая из текущей точки над центром апертура не будет соответствовать первой зоне Френеля, после чего пульсации прекращаются, и происходит монотонное убывание линии амплитудного профиля. При ограничении длины волновой трубки по последнему экстремуму следует выбирать $n_0 = 1$ в формуле (7).

Примеры численного моделирования показывают, что последний локальный экстремум продольного профиля приходится на промежуточную зону апертуры. Известная условная граница дальней зоны приходится на относительные расстояния $2(D/\lambda)^2$ и соответствует убыванию продольного профиля ниже 20% от своего максимального значения в локальном экстремуме промежуточной зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruce R.A. *Modeling of the electromagnetic radiation from shielded enclosures with apertures and attached wires in a real-world environment*: dissertation. Doctor of Philosophy in Engineering. Durham: University of New Hampshire; 1997. 103 p. URL: <https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2935&context=dissertation>
2. Teniou M., Roussel H., Capet N., Piau G., Casaletti M. Implementation of radiating aperture field distribution using tensorial metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017;65(11):5895–5907. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2751652>
3. Serhir M., Geffrin J.-M., Litman A., Ribi re-Tharaud N., Besnier P. Aperture antenna modelling by a finite number of elemental dipoles from truncated spherical field measurement: Experimental investigation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2010;58(4):1260–1268. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2041157>
4. Сазонов Д.М. *Антенны и устройства СВЧ: учебник для вузов*. М.: Высшая школа; 1988. 432 с. ISBN 5-06-001149-6

На рис. 8 показаны амплитудные профили электромагнитного поля кольцевых апертур, соответствующих двум соседним зонам Френеля. Обычно полагают, что две соседние зоны Френеля с большими номерами компенсируют друг друга. Однако такая компенсация наблюдается лучше всего на продольном амплитудном профиле поля внутри волновой трубки, а сами по себе выделенные в кольцевой излучатель соседние зоны имеют вполне отличный от нуля поперечный профиль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложены основные принципы, исходя из которых реализована вычислительная модель электромагнитного поля плоской синфазной прямоугольной, круглой и кольцевой излучающих апертур.

Изложенные принципы могут быть положены в основу разработки вычислительных моделей электромагнитного поля и для других электродинамических абстракций, предполагающих декомпозицию на элементарные излучатели.

Исследованы поперечные и продольные амплитудные профили электромагнитного поля круглой и кольцевой излучающих апертур. Предложены подходы к оценке длины волновой трубки в промежуточной зоне. Относительная длина волновой трубки как минимум в 4 раза меньше квадрата относительного диаметра круглой апертуры.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

REFERENCES

1. Bruce R.A. *Modeling of the electromagnetic radiation from shielded enclosures with apertures and attached wires in a real-world environment*: dissertation. Doctor of Philosophy in Engineering. Durham: University of New Hampshire; 1997. 103 p. Available from URL: <https://scholars.unh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2935&context=dissertation>
2. Teniou M., Roussel H., Capet N., Piau G., Casaletti M. Implementation of radiating aperture field distribution using tensorial metasurfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017;65(11):5895–5907. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2751652>
3. Serhir M., Geffrin J.-M., Litman A., Ribi re-Tharaud N., Besnier P. Aperture antenna modelling by a finite number of elemental dipoles from truncated spherical field measurement: Experimental investigation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2010;58(4):1260–1268. <https://doi.org/10.1109/TAP.2010.2041157>
4. Sazonov D.M. *Antennas and microwave devices: textbook for universities*. Moscow: Vysshaya shkola; 1988. 432 p. (in Russ.). ISBN 5-06-001149-6

5. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. *Устройства СВЧ и антенны*. М.: Радиотехника; 2006. 376 с. ISBN: 5-88070-086-0
6. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. *Антенно-фидерные устройства*. М.: Сов. радио; 1974. 536 с.
7. Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г. *Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: учебник для вузов*. М.: Горячая линия-Телеком; 2004. 491 с.
8. Петров Б.М. *Электродинамика и распространение радиоволн: учебник для вузов*. М.: Горячая линия-Телеком; 2004. 558 с. ISBN: 5-93517-073-6
9. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. *Антенны УКВ: в 2 ч. М.: Связь; 1977*.
10. Ротхаммель К. *Антенны: в 2 т.: пер. с нем. М.: Лайт-ЛТД; 2007. 820 с.*
11. Каганов В.И., Чык Б.Х. Беспроводная передача электрической энергии. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):47–53. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-47-53>
12. Никольский В.В., Никольская Т.И. *Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов*. М.: Наука; 1989. 544 с. ISBN 5-02-014033-3
13. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Электромагнитные поля и волны вблизи апертурных антенн больших электрических размеров. *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина № 1115. Серия «Радиофизика и электроника»*. 2012;24:111–118.
14. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Волновые процессы в прожекторном луче апертурных антенн. *Прикладная радиоэлектроника*. 2015;14(1):51–58.
15. Горобец Н.Н., Овсянникова Е.Е. Влияние размеров и формы излучающего раскрытия на характер пространственного распределения поля вблизи антенны. *Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина № 1094. Серия «Радиофизика и электроника»*. 2013;23:51–59. URL: <http://rbeecs.karazin.ua/wp-content/uploads/vestnik/vestnik-1094.pdf>
5. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroistva SVCh i anteny (Microwave devices and antennas)*. Moscow: Radiotekhnika; 2006. 376 p. (in Russ.). ISBN: 5-88070-086-0
6. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroistva (Antenna feeder devices)*. Moscow: Sovetskoe radio; 1974. 536 p. (in Russ.).
7. Erokhin G.A., Chernyshev O.V., Kozyrev N.D., Kocherzhhevskii V.G. *Antenno-fidernye ustroistva i rasprostranenie radiovoln: uchebnik dlya vuzov (Antenna feeder devices and radio wave propagation: textbook for universities)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2007. 531 p. (in Russ.). ISBN 978-5-93517-370-0
8. Petrov B.M. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: uchebnik dlya vuzov (Electrodynamics and radio wave propagation: textbook for universities)*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom; 2004. 558 p. (in Russ.). ISBN: 5-93517-073-6
9. Aizenberg G.Z., Yampol'skii V.G., Tereshin O.N. *Anteny UKV: v 2 ch. (VHF antennas: in 2 v.)*. Moscow: Svyaz'; 1977. (in Russ.).
10. Rothammel K. *Anteny: v 2 t. (Antennas: in 2 v.)*. Moscow: Lait-LTD; 2007. 820 p. (in Russ.).
11. Kaganov W.I., Chuk B.Kh. Wireless power transmission. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):47–53 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-47-53>
12. Nikol'skii V.V., Nikol'skaya T.I. *Elektrodinamika i rasprostranenie radiovoln: ucheb. posobie dlya vuzov (Electrodynamics and radio waves propagation: textbook for universities)*. Moscow: Nauka; 1989. 544 p. (in Russ.). ISBN 5-02-014033-3
13. Gorobets N.N., Ovsyannikova E.E. Electromagnetic fields and waves near large electrical aperture antennas. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo universiteta imeni V.N. Karazina № 1115. Seriya "Radiofizika i elektronika" = Bulletin of Karazin Kharkiv National University. № 1115. Series "Radiophysics and Electronics"*. 2012;24:111–118 (in Russ.).
14. Gorobets N.N., Ovsyannikova E.E. Wave processes in a projecting ray of aperture antennas. *Prikladnaya radioelektronika = Applied Radio Electronics*. 2015;14(1):51–58 (in Russ.).
15. Gorobets N.N., Ovsyannikova E.E. Influence of the size and shape of the radiating aperture on the nature of the spatial distribution of the field near the antenna. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo universiteta imeni V.N. Karazina № 1094. Seriya "Radiofizika i elektronika" = Bulletin of Karazin Kharkiv National University. № 1094. Series "Radiophysics and Electronics"*. 2013;23:51–59 (in Russ.). Available from URL: <http://rbeecs.karazin.ua/wp-content/uploads/vestnik/vestnik-1094.pdf>

Об авторах

Исаков Владимир Николаевич, старший преподаватель, кафедра радиоволновых процессов и технологий Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: isakov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5996-183X>

Ланкина Виктория Сергеевна, студентка, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: vikulka2811@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7722-3155>

About the authors

Vladimir N. Isakov, Senior Lecturer, Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: isakov@mirea.ru. <https://orcid.org/0000-0002-5996-183X>

Viktoriia S. Lankina, Student, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: vikulka2811@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7722-3155>