



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**ГОУВПО
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИ-
ТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»**

В.П. КУБАНОВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Рекомендовано
методическим советом ГОУВПО
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по специальностям «Системы
связи с подвижными объектами», «Радио-
связь, радиовещание и телевидение»,
«Защищенные системы связи».

Самара 2015

УДК .621.396.6

Рецензент:

декан факультета заочного обучения, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Основы конструирования и технологии радиотехнических систем» ГОУВПО ПГУТИ **О.В. Осипов**

У ч е б н о е п о с о б и е

Кубанов В.П.

**Элементарные излучатели электромагнитных волн. — Са-
мара: ПГУТИ, 2015.— 40 с., ил.**

Излагаются основные сведения по структуре электромагнитного поля элементарных излучателей в дальней зоне. Для фиксированной системы координат рассматриваются различные ориентации излучателей в пространстве.

Приводятся условия ряда задач для самостоятельного решения. Все задачи, как правило, с ответами. В качестве примера приводится подробное решение двух задач.

Формулируются вопросы и задания для самоконтроля качества усвоения материала.

ГОУВПО ПГУТИ Кубанов В.П.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ	5
1.1. Определение	5
1.2. Структура поля в дальней зоне	5
1.3. Средняя плотность потока энергии, мощность и сопротивление излучения	7
1.4. Коэффициент направленного действия	10
1.5. Обобщение определения элементарного электрического излучателя	11
2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ МАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ	13
2.1. Определение	13
2.2. Элементарный щелевой излучатель	14
2.3. Элементарная электрическая рамка	16
3. ЭЛЕМЕНТ ГЮЙГЕНСА	19
3.1. Определение	20
3.2. Структура поля и направленные свойства	21
3.3. Коэффициент направленного действия	23
4. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ	24
4.1. О размерностях некоторых физических величин электромагнитного поля	24
4.2. Задачи	26
5. ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ	35
ЛИТЕРАТУРА	37

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие «Элементарные излучатели электромагнитных волн» написано для студентов специальности «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также студентов направления «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (профиль «Сети и системы радиосвязи»). В учебных планах этой специальности и этого направления имеются дисциплины, связанные с изучением электромагнитных полей и волн, антенно-фидерных устройств.

Изучение полей элементарных излучателей (элементарного электрического излучателя, физических реализаций элементарного магнитного излучателя, элемента Гюйгенса) крайне важно для понимания процесса излучения электромагнитных волн реальными антеннами. Дело в том, что в теории антенн широко используется метод суперпозиции, сводящийся к разбиению антенны на элементарные излучатели и последующему суммированию их полей.

Ученое пособие можно разделить на три части. В первой части (разделы 1-3) Излагаются основные сведения по структуре поля элементарных электрических излучателей в дальней зоне. При этом для фиксированной системы координат рассматриваются различные ориентации излучателей в пространстве. Особое внимание уделяется нахождению значений модуля напряженности электрического и магнитного полей в расчетной точке, а также пояснению принципа формирования направленных свойств — амплитудных характеристик (диаграмм) направленности.

Во второй части (раздел 4) приводятся условия ряда задач для самостоятельного решения. Для всех задач, как правило, приведены ответы. Две задачи полностью решены и не потому, что задачи сложны для решения — это скорее пример (иллюстрация) оформления решения и иллюстрация целесообразности использования программного продукта Mathcad.

Наконец, в третьей части дается материал для самоконтроля качества усвоения темы. Самостоятельные ответы на вопросы и выполнение заданий поможет подготовиться к промежуточной аттестации (зачеты, экзамены), проводимой как в традиционной форме, так и форме тестирования.

Учебное пособие может быть использовано при подготовке бакалавров и специалистов радиотехнических направлений и специальностей. Содержание пособия направлено на формирование необходимых профессиональных компетенций в сферах деятельности: сервисно-эксплуатационной, расчетно-проектной и экспериментально-исследовательской.

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

1.1. Определение

Элементарным электрическим излучателем называется короткий по сравнению с длиной волны провод ($l \ll \lambda$), по которому течет гармонический электрический ток $i = I_0 \cos \omega t$, амплитуда и фаза которого одинаковы в любой точке провода (рис. 1.1а). Заметим, что поперечные размеры провода должны быть намного меньше его длины. Такая модель излучателя является, по существу, идеализированной, удобной для анализа излучающей системы, так как практическое создание излучателя с неизменной по всей длине амплитудой и фазой тока невозможно. Однако диполь Герца (рис. 1.1б) оказывается весьма близким по своим свойствам к элементарному излучателю. Благодаря металлическим шарам, которые обладают значительной емкостью, амплитуда тока слабо изменяется вдоль проводника.

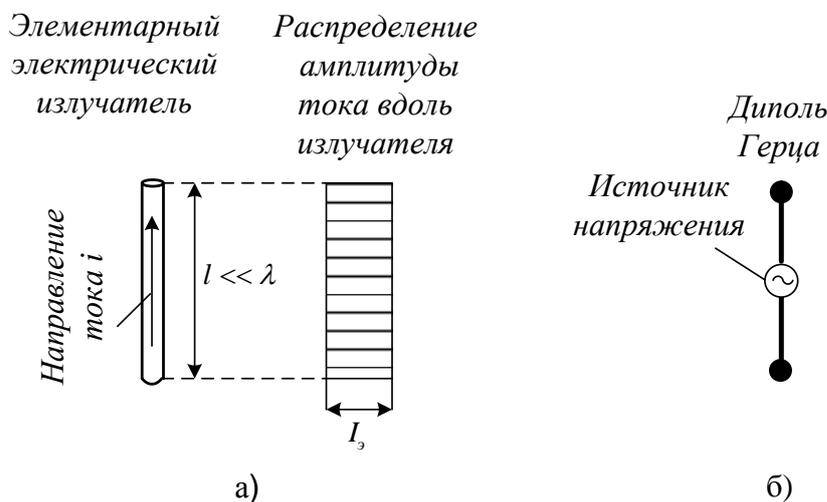


Рис. 1.1

Сложные проводящие тела, обтекаемые токами, можно считать как бы состоящими из множества элементарных электрических излучателей. Такая возможность вытекает из того, что каково бы ни было распределение амплитуды и фазы тока по проводящему телу, в пределах отрезка $l \ll \lambda$ их можно принять неизменными. При определении поля, создаваемого этими токами, можно воспользоваться принципом суперпозиции, т.е. рассматривать его как сумму полей элементарных излучателей.

1.2. Структура поля в дальней зоне

Задача нахождения векторов напряженности электрического и магнитного полей \vec{E} и \vec{H} , возбуждаемых током, протекающим по поверхности элементарного электрического излучателя, решается строго с помощью известных методов электродинамики [1], [2]. Характерным для векторов поля является их сложная

зависимость от расстояния r между излучателем и точкой, в которой определяется поле (точкой наблюдения). Такое обстоятельство послужило причиной условного разделения всего пространства, в котором находится излучатель, на три зоны: ближнюю, промежуточную и дальнюю. Ближняя зона соответствует условию $kr \ll 1$ ($k = 2\pi/\lambda$ — волновое число или фазовый коэффициент, λ — длина волны в свободном пространстве). Дальняя или волновая зона (эту зону иногда называют зоной излучения) соответствует условию $kr \gg 1$. Очевидно, что промежуточная зона находится между ближней и дальней зонами.

Для практики радиосвязи, радиовещания и телевизионного вещания особый интерес представляет дальняя зона. Последнее вовсе не означает, что поле ближней и промежуточной зоны не представляет практического интереса. Наоборот — многие задачи электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, задачи электромагнитной экологии решаются на основе исследования структуры поля реальных излучателей именно в этих зонах.

Рассмотрим элементарный электрический излучатель, ориентированный в сферической системе координат так, как это показано на рис. 1.2.

В произвольной точке M , находящейся в дальней зоне, учитываются только две составляющих напряженности электрического и магнитного полей $\vec{E} = \vec{\theta}_0 E_\theta$ и $\vec{H} = \vec{\varphi}_0 H_\varphi$, комплексные амплитуды которых определяются по формулам:

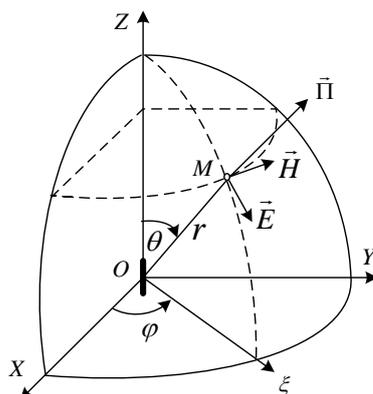


Рис. 1.2

$$\vec{E}_m = \vec{\theta}_0 \dot{E}_{\theta m} = \vec{\theta}_0 j(W_0 I_0 l / 2r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (1.1)$$

$$\vec{H}_m = \vec{\varphi}_0 \dot{H}_{\varphi m} = \vec{\varphi}_0 j(I_0 l / 2r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (1.2)$$

где

I_0 — амплитуда тока в излучателе;

l — длина излучателя;

r — расстояние от излучателя до точки наблюдения;

λ — длина волны;

θ — угол между осью излучателя и направлением на точку наблюдения;

$W_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120\pi = 377$ Ом — характеристическое сопротивление свободного пространства.

Векторы \vec{E} и \vec{H} перпендикулярны направлению распространения волны и тангенциальны к сферическому волновому фронту. Излучаемая электромагнитная волна имеет линейную поляризацию и обладает отличными от нуля составляющим E_θ и H_φ . Следовательно, в течение одного периода колебания векторы \vec{E} и \vec{H} остаются параллельными некоторым прямым линиям [1].

Мгновенное значение вектора Пойнтинга (вектор $\vec{\Pi}$ на рис. 1.2) определяется известным выражением $\vec{\Pi} = [\vec{E}, \vec{H}]$.

1.3. Средняя плотность потока энергии, мощность и сопротивление излучения

Зная структуру поля, можно найти очень важные характеристики элементарного электрического излучателя [1]:

– среднее (во времени — за период) значение плотности потока энергии (среднее значение вектора Пойнтинга)

$$\vec{\Pi}_{cp} = \vec{r}_0 |\dot{E}_{m\theta}|^2 / 2W_0, \quad (1.3)$$

– мощность излучения

$$P_\Sigma = 40\pi^2 (l/\lambda)^2 I_0^2, \quad (1.4)$$

– сопротивление излучения

$$R_\Sigma = (2\pi/3)(l/\lambda)^2 W_0. \quad (1.5)$$

1.4. Направленные свойства

Обе составляющих поля прямо пропорциональны синусу угла θ , между осью излучателя и радиусом-вектором из начала координат в рассматриваемую точку пространства и не зависят от угла φ . Вдоль своей оси ($\theta = 0^\circ$) и ($\theta = 180^\circ$) излучатель не создает поля — $\dot{E}_{\theta m}$ и $\dot{H}_{\varphi m}$ равны нулю, так как $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0$. Максимальное поле наблюдается в направлении нормали к оси излучателя в экваториальной плоскости. Здесь $\theta = 90^\circ$, $\sin 90^\circ = 1$, а множители $W_0 I_0 l / 2r\lambda$ в (1.1) и $I_0 l / 2r\lambda$ в (1.2) не зависят от угловых координат. Следовательно, элементарный электрический излучатель — это простейшая антенна, обладающая направленными свойствами.

Выражение $\dot{E}_{\theta m}$, входящее в (1.1), можно записать в виде трех множителей: постоянного, не зависящего от направления на точку наблюдения ($A = W_0 I_0 l / 2r\lambda$), множителя, зависящего от направления на точку наблюдения $\sin \theta$, и фазового множителя je^{-jkr} . С учетом этого формулы (1.1) и (1.2) примут вид:

$$\dot{E}_m = \vec{\theta}_0 A \sin \theta je^{-jkr}, \quad (1.6)$$

$$\dot{H}_m = \vec{\varphi}_0 (A/W_0) \sin \theta je^{-jkr}. \quad (1.7)$$

Функция $f(\theta) = A \sin \theta$ при фиксированном расстоянии r определяет зависимость значений напряженности поля от угловой координаты θ , т.е. является характеристикой направленности элементарного электрического излучателя в

меридиональной плоскости. Заметим, что $f(\theta) = A \sin \theta$ определяет не только значение, но и фазу напряженности поля, так как при переходе функции через нуль меняется её знак, что соответствует скачку фазы напряженности поля на 180° . Поэтому модуль функции $|f(\theta)| = A |\sin \theta|$ — амплитудная характеристика направленности элементарного электрического излучателя в меридиональной плоскости. Значение напряженности поля связано с амплитудной характеристикой направленности соотношением

$$|\dot{E}_{m\theta}| = |f(\theta)| = A |\sin \theta|. \quad (1.8)$$

Когда речь идет о направленных свойствах антенн, то интересуются характером зависимости напряженности поля от направления на точку наблюдения, а не абсолютным значением напряженности поля. Поэтому обычно используют понятие нормированной, т.е. отнесенной к максимальному значению, амплитудной характеристики направленности. Для элементарного электрического излучателя $F(\theta) = |f(\theta)|/|f(\theta)_{max}| = A |\sin \theta|/A |\sin \theta_{max}| = |\sin \theta|$ так как $|\sin \theta_{max}| = 1$. Максимальное значение нормированной амплитудной характеристики направленности всегда равно единице.

Графическое изображение нормированной амплитудной характеристики направленности называют нормированной амплитудной диаграммой направленности антенны. Пространственная нормированная амплитудная диаграмма направленности, изображаемая в виде некоторой поверхности $F(\theta, \varphi)$ представляет собой объемную фигуру. Построение такой диаграммы сложно. На практике обычно пользуются плоскостными амплитудными диаграммами направленности, изображающими зависимость значений напряженности поля от направления в одной из двух главных плоскостей. Главными плоскостями для элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) будут: любая меридиональная плоскость, проходящая через ось излучателя, например, плоскости $ZOX, ZOY, ZO\xi$, а также экваториальная плоскость XOY , перпендикулярная оси излучателя и проходящая через его середину. В рассматриваемом случае меридиональная плоскость является E – плоскостью, а экваториальная — H – плоскостью.

Нормированная амплитудная диаграмма направленности элементарного электрического излучателя в меридиональной плоскости $F(\theta) = |\sin \theta|$ в полярной системе координат изображена на рис. 1.3а. В экваториальной плоскости ($\theta = 90^\circ$) амплитудная диаграмма направленности $F(\varphi) = const = 1$ не зависит от угла φ (следствие осевой симметрии излучателя) и является окружностью (рис. 1.3б). Нормированные амплитудные диаграммы направленности элементарного электрического излучателя, построенные в декартовой системе координат, изображены на рис. 1.4а (меридиональная плоскость) и на рис. 1.4б (экваториальная плоскость). Элементарный электрический излучатель имеет пространственную амплитудную диаграмму направленности $F(\theta, \varphi)$ в виде тороида. Его поверхность образована вращением фигуры («восьмерки»), приведенной на рис. 1.3а, вокруг оси OZ . На рис. 1.5 показана часть тороида в области пространства $90^\circ \leq \varphi \leq 270^\circ$.

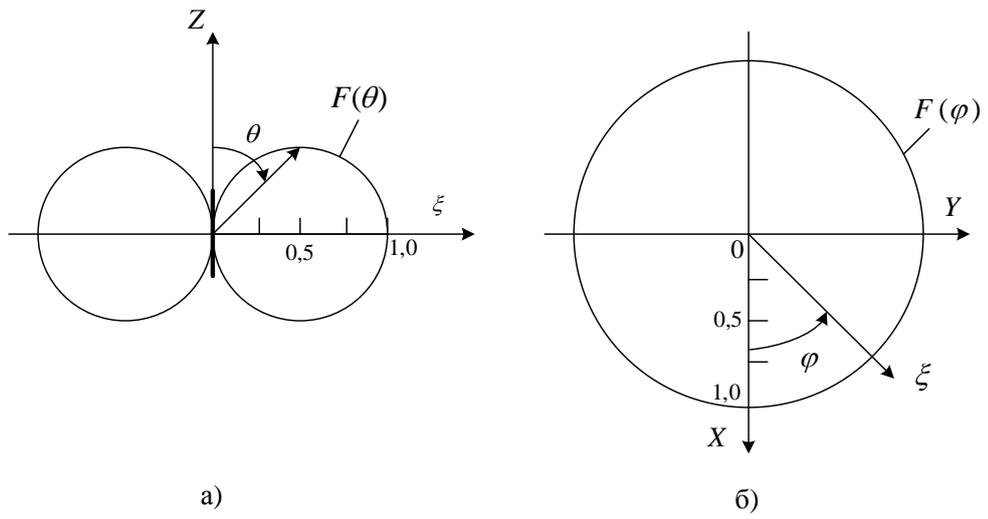


Рис. 1.3

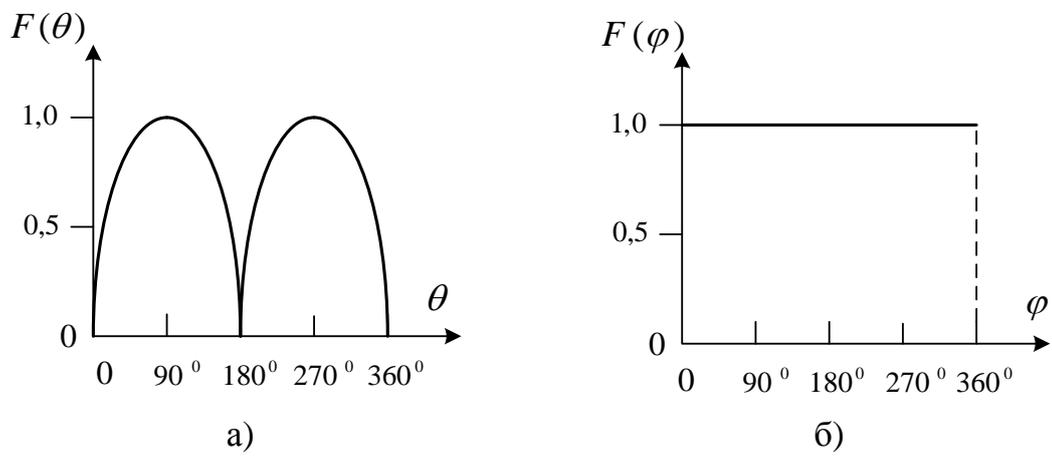


Рис. 1.4

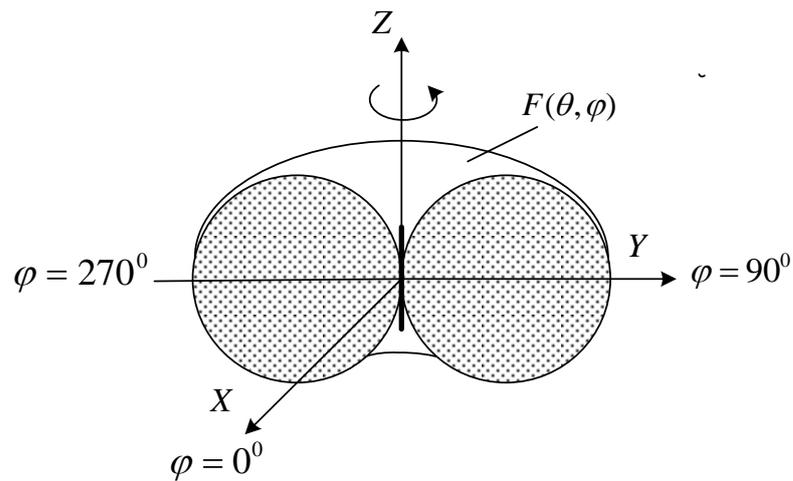


Рис.1.5

В случае, когда излучатель ориентирован вдоль оси ОХ (рис. 1.6а) или вдоль оси ОУ (рис. 1.6б), структура поля в дальней зоне будет характеризоваться составляющими $\vec{E} = \vec{\theta}_0 E_\theta + \vec{\varphi}_0 E_\varphi$, $\vec{H} = \vec{\theta}_0 H_\theta + \vec{\varphi}_0 H_\varphi$.

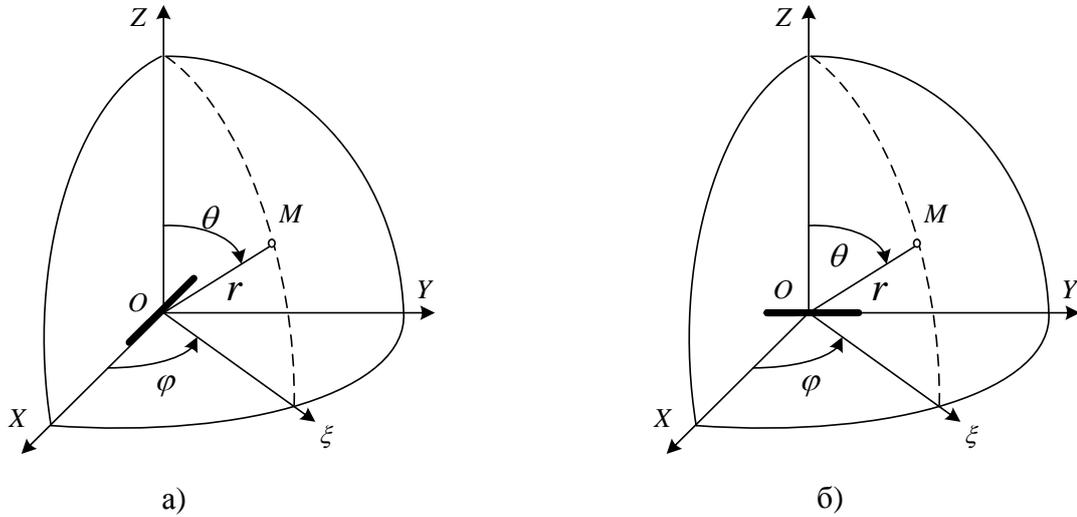


Рис. 1.6

Модули комплексных амплитуд отдельных составляющих при ориентации излучателя вдоль оси X или оси Y определяются соотношениями:

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\theta m}| = A |\cos \theta \cos \varphi|, |\dot{E}_{\varphi m}| = A |\sin \varphi|; \\ |\dot{H}_{\theta m}| = (A/W_0) |\sin \varphi|, |\dot{H}_{\varphi m}| = (A/W_0) |\cos \theta \cos \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 1.6а, (1.9)}$$

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\theta m}| = A |\cos \theta \sin \varphi|, |\dot{E}_{\varphi m}| = A |\cos \varphi|; \\ |\dot{H}_{\theta m}| = (A/W_0) |\cos \varphi|, |\dot{H}_{\varphi m}| = (A/W_0) |\cos \theta \sin \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 1.6б. (1.10)}$$

Модули полных векторов через их составляющие определяются соотношениями:

$$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\dot{E}_{\theta m}|^2 + |\dot{E}_{\varphi m}|^2}, |\dot{H}_m| = \sqrt{|\dot{H}_{\theta m}|^2 + |\dot{H}_{\varphi m}|^2}. \quad (1.11)$$

1.5. Коэффициент направленного действия

Элементарный электрический излучатель является слабонаправленной антенной, но, тем не менее, обеспечивающим пространственное перераспределение плотности потока энергии по сравнению с воображаемой абсолютно ненаправленной (изотропной) антенной. Степень пространственного перераспределения плотности потока энергии характеризуется коэффициентом направленного действия (КНД). Известно, что КНД является отношением среднего значения плотности потока энергии, создаваемого в некоторой точке с координатами θ, φ направленной антенной ($\Pi_{cp}^{нап}(\theta, \varphi)$), к среднему значению плотности потока энергии, создаваемого в этой же точке изотропной антенной ($\Pi_{cp}^{изотр}$). При

этом должно соблюдаться условие равенства мощностей, излучаемых направленной и изотропной антеннами $P_{\Sigma}^{напр} = P_{\Sigma}^{изотр}$. Формализованное представление для КНД, вытекающее из его определения, имеет вид

$$D(\theta, \varphi) = \Pi_{cp}^{напр}(\theta, \varphi) / \Pi_{cp}^{изотр}. \quad (1.12)$$

В свободном пространстве $\Pi_{cp}^{напр}(\theta, \varphi)$ определяется из выражения (1.3) с использованием (1.1)

$$\Pi_{cp}^{напр}(\theta, \varphi) = |\dot{E}_{m\theta}|^2 / 2W_0 = |(W_0 I_0 l / 2r\lambda) \sin \theta|^2 / 2W_0. \quad (1.13)$$

Значение $\Pi_{cp}^{изотр}$ можно определить через мощность излучения (1.4) и площадь поверхности усреднения — сферы радиуса r :

$$\Pi_{cp}^{изотр} = P_{\Sigma} / 4\pi r^2 = 40\pi^2 (l/\lambda)^2 I_0^2 / 4\pi r^2. \quad (1.14)$$

Подстановка (1.13) и (1.14) в (1.12) позволяет получить $D(\theta) = 1,5 \sin^2 \theta$. Здесь функция $\sin^2 \theta$ является квадратом нормированной амплитудной характеристики элементарного электрического излучателя $F(\theta)$. Если нет специальной оговорки, то под КНД обычно понимается его максимальное значение

$D_0 = D_{max}$, которое имеет место в направлении, совпадающем с максимумом нормированной амплитудной характеристики направленности. В случае элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) оно соответствует $\theta = 90^\circ$, когда $\sin \theta = 1$, и поэтому $D_0 = D_{max} = 1,5$.

1.6. Обобщение определения элементарного электрического излучателя

Пусть элементарный электрический излучатель представляет собой элемент длинного провода, обладающего идеальной проводимостью (рис. 1.7а). Линейный размер элемента по-прежнему удовлетворяет условию $l \ll \lambda$. В соответствии с граничными условиями [1], [2] на границе раздела «идеальный проводник (провод) — диэлектрик (свободное пространство)» тангенциальная составляющая вектора \vec{E} равна нулю, а тангенциальная составляющая вектора \vec{H} определяется значением плотности поверхностного тока. Действительно, поскольку $\vec{\sigma}_s^3 = [\vec{n}_0 \times \vec{H}_\tau]$, а \vec{n}_0 — единичный вектор, совпадающий с нормалью к боковой поверхности излучателя (рис. 1.7б), то $H_\tau = \sigma_s^3$. В то же время известно [1], что $\sigma_s^3 = I_0 / L$, где I_0 — амплитуда тока провода, L — периметр поперечного сечения провода. Направление вектора $\vec{\sigma}_s^3$ совпадает с осью излучателя. Вектор \vec{H}_τ ориентирован по периметру сечения. На рис. 1.7б в качестве примера обозначены три точки — 1, 2 и 3, в которых показаны векторы $\vec{\sigma}_s^3$ и \vec{H}_τ . Составляющая вектора \vec{H} , нормальная к поверхности излучателя, равна нулю. Картина магнитных и электрических силовых линий элементарного электрического излучателя показана на рис. 1.7в.

Таким образом, элементарный электрический излучатель можно рассматривать как элемент поверхности $S = Ll$, тангенциально к которой действуют силовые магнитные линии, а тангенциальные электрические силовые линии отсутствуют.

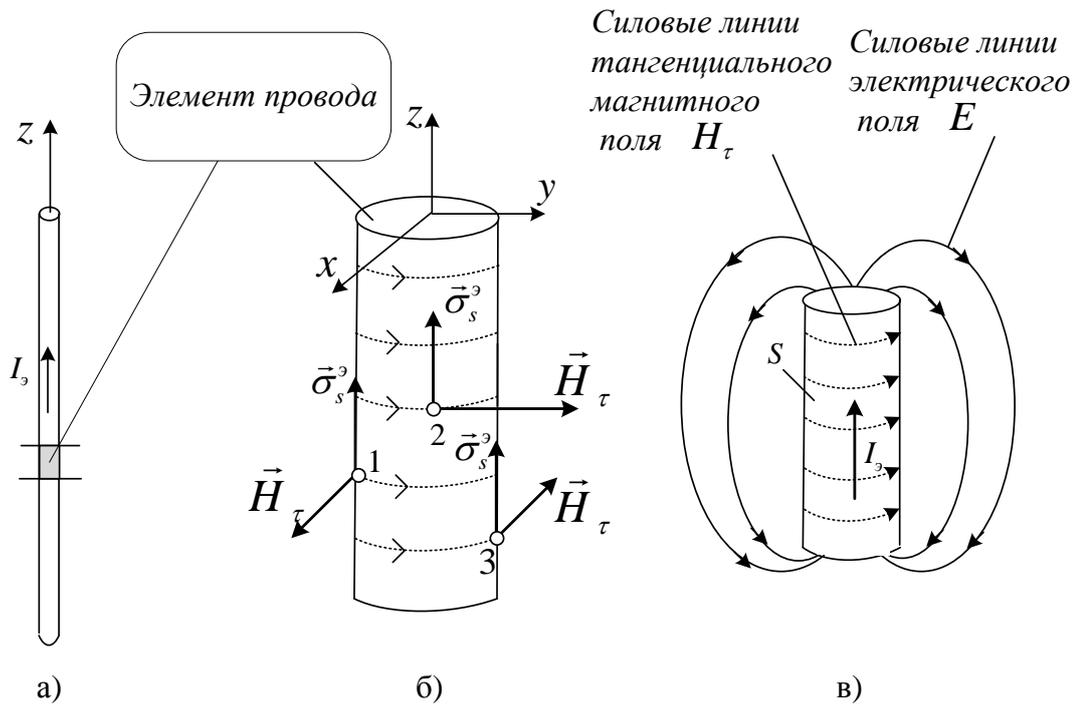


Рис. 1.7

Поля в пространстве вокруг элементарного электрического излучателя могут быть выражены через тангенциальную составляющую магнитного поля на поверхности этого излучателя. Для этого в (1.1) и (1.2) достаточно произвести замену $I_z = H_\tau L$. Другими словами, если на поверхности любой формы задана тангенциальная составляющая магнитного поля, то элементарный участок этой поверхности с линейным размером $l \ll \lambda$ можно считать элементарным электрическим излучателем.

2. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ МАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

2.1. Определение

Элементарным магнитным излучателем называется короткий по сравнению с длиной волны элемент ($l \ll \lambda$), по которому протекает гармонический магнитный ток $i = I_M \cos \omega t$, амплитуда и фаза которого одинаковы в любой точке элемента. Заметим, что поперечные размеры элемента должны быть намного меньше его длины. Обратимся к рис. 2.1: одна его часть (а) повторяет рис. 1.7в, другая — (б) соответствует элементарному магнитному излучателю [1].

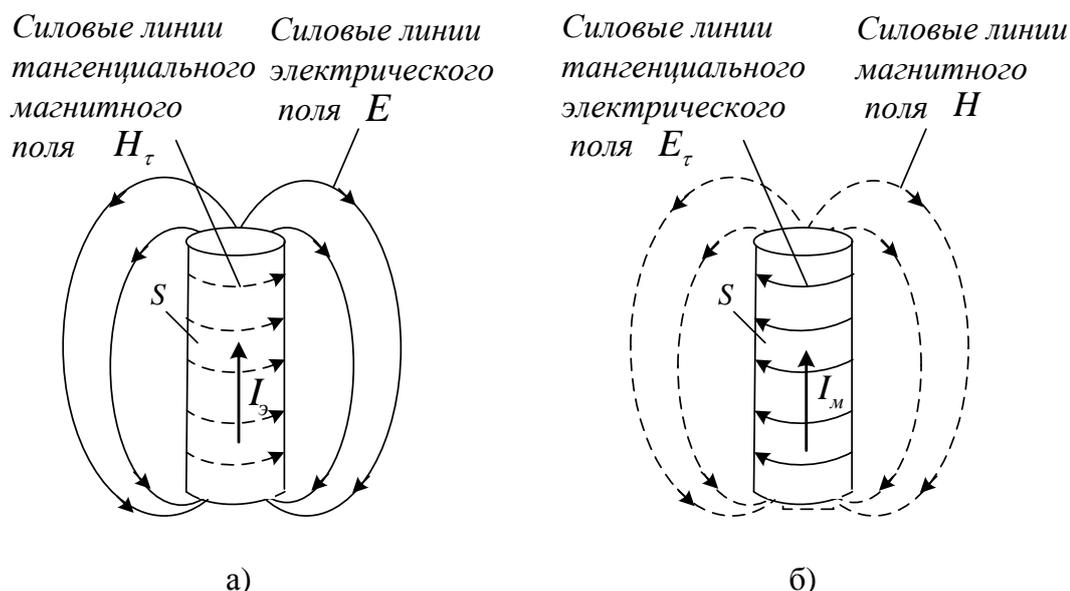


Рис. 2.1

Модель элементарного магнитного излучателя (рис. 2.1б) можно представить как систему, идентичную модели элементарного электрического излучателя (рис. 2.1а), но отличающуюся тем, что тангенциально к элементарной поверхности S действуют замкнутые электрические силовые линии, а тангенциальное магнитное поле равно нулю. Другими словами, если на поверхности любой формы задана тангенциальная составляющая электрического поля, то элементарный участок этой поверхности с линейным размером $l \ll \lambda$ можно считать элементарным магнитным излучателем.

Может возникнуть вопрос — о каком магнитном излучателе может идти речь, если хорошо известно, что ни магнитных зарядов, ни магнитного тока проводимости в природе не существует? Действительно, магнитный ток — это определенная абстракция, виртуальная аналогия электрического тока. Однако тангенциальная составляющая электрического поля на элементах реальных физических объектов и структура поля, показанная на рис. 2.1б, вполне реальны. Они будут рассмотрены в следующих разделах. Мы вольны по аналогии с известной физической величиной — вектором плотности электрического тока

$$\vec{\sigma}_s^{\partial} = [\vec{n}_0, \vec{H}_\tau] \quad (2.1)$$

назвать векторное произведение

$$\vec{\sigma}_s^M = -[\vec{n}_0, \vec{E}_\tau] \quad (2.2)$$

вектором плотности магнитного тока элементарного магнитного излучателя.

2.2. Элементарный щелевой излучатель

Рассмотрим бесконечную протяженную идеально проводящую плоскость Ψ , в которой прорезана узкая щель (рис. 2.2а). Если щель возбудить при помощи генератора высокой частоты напряжением $u = U \sin \omega t$, то в ней возникнет электрическое поле, линии которого \vec{E}_τ перпендикулярны краям щели. При выполнении условий $l \ll \lambda$, а также $b \ll l$ (щель – узкая) можно считать, что напряженность электрического поля вдоль щели не изменяется ни по амплитуде, ни по фазе. Такая структура называется элементарной излучающей щелью. Элементарную щель можно рассматривать как реальный излучатель, создающий такое же электромагнитное поле, как виртуальный элементарный магнитный излучатель. Структура поля, создаваемая элементарной щелью в дальней зоне ($kr \gg 1$), поясняется на рис. 2.2б.

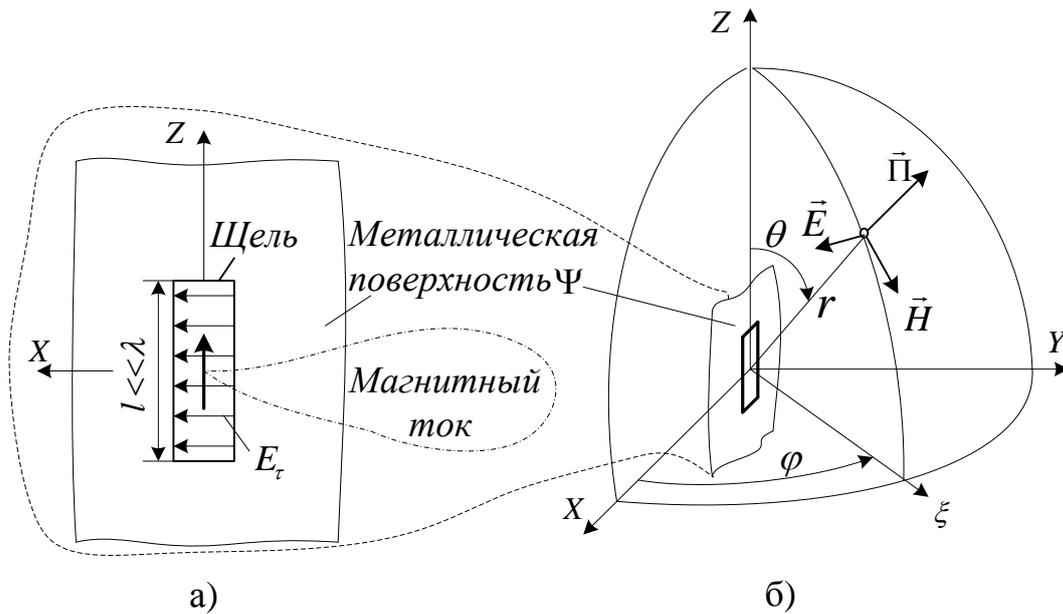


Рис. 2.2

В произвольной точке наблюдения, находящейся в дальней зоне свободного пространства, учитываются только две составляющих $\vec{E} = -\vec{\varphi}_0 E_\varphi$ и $\vec{H} = \vec{\theta}_0 H_\theta$, комплексные амплитуды которых определяются по формулам:

$$\vec{E}_m = \vec{\varphi}_0 \dot{E}_{\varphi m} = -\vec{\varphi}_0 j(Ul/r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (2.3)$$

$$\vec{H}_m = \vec{\theta}_0 \dot{H}_{\theta m} = \vec{\theta}_0 j(Ul/W_0 r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (2.4)$$

где:

U – амплитуда напряжения возбуждения щели;

l – длина щели;

r – расстояние от щели до точки наблюдения;

λ – длина волны;

θ – угол между осью щели и направлением на точку наблюдения;

W_0 – характеристическое сопротивление свободного пространства.

Излучаемая электромагнитная волна имеет линейную поляризацию. Мгновенное значение вектора Пойнтинга (вектор $\vec{\Pi}$ на рис. 2.2б) определяется выражением $\vec{\Pi} = [\vec{E}, \vec{H}]$.

Зная структуру поля, можно найти очень важные характеристики элементарного щелевого излучателя:

– среднее (во времени — за период) значение плотности потока энергии (среднее значение вектора Пойнтинга)

$$\vec{\Pi}_{cp} = \vec{r}_0 |\dot{E}_{m\varphi}|^2 / 2W_0, \quad (2.5)$$

– мощность излучения щели

$$G_{\Sigma}^{ul} = (1/45)(l/\lambda)^2, \quad (2.6)$$

– проводимость излучения щели

$$P_{\Sigma} = U^2 G_{\Sigma}^{ul} / 2. \quad (2.7)$$

Выражение $\dot{E}_{\varphi m}$, входящее в (2.3), можно записать в виде трех множителей: постоянного, не зависящего от направления на точку наблюдения $B = Ul/r\lambda$, множителя, зависящего от направления на точку наблюдения $\sin \theta$, и фазового множителя $-je^{-jkr}$. С учетом этого формулы (2.3) и (2.4) примут вид:

$$\dot{E}_m = -\vec{\varphi}_0 B \sin \theta j e^{-jkr}, \quad (2.8)$$

$$\dot{H}_m = \vec{\theta}_0 (B/W_0) \sin \theta j e^{-jkr}. \quad (2.9)$$

Сравнение формул (2.8), (2.9) для излучающей щели и (1.6), (1.7) для элементарного электрического излучателя показывает, что направленные свойства элементарной излучающей щели и элементарного электрического излучателя совершенно идентичны.

Главными плоскостями для элементарной излучающей щели (рис. 2.2б) будут: любая меридиональная плоскость, проходящая через ось щели, например, плоскости $ZOX, ZOY, ZO\xi$, а также экваториальная плоскость XOY , перпендикулярная оси щели и проходящая через её середину. В рассматриваемом случае меридиональная плоскость является H – плоскостью, а экваториальная — E – плоскостью. Следует обратить внимание на следующее — меридиональная плоскость стала H – плоскостью (у элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) она была E – плоскостью), а экваториальная плоскость стала E – плоскостью (у элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) она была H – плоскостью).

Нормированная амплитудная характеристика направленности элементарной излучающей щели в меридиональной плоскости по-прежнему описывается функцией $F(\theta) = |\sin \theta|$, а в экваториальной — $F(\varphi) = const = 1$. Нормированные амплитудные диаграммы направленности в полярной и прямоугольной системе координат, пространственная амплитудная диаграмма направленности

соответствуют диаграммам, приведенным на рис. 1.3, рис. 1.4 и рис. 1.5. Вполне очевидно, что и максимальный коэффициент направленного действия элементарной излучающей щели равен 1,5, т.е. в точности равен значению аналогичного параметра для элементарного электрического излучателя.

При ориентации щели вдоль оси OX (рис. 2.3а) или вдоль оси OY (рис. 2.3б), структура её поля в волновой зоне будет характеризоваться составляющими $\vec{E} = \vec{\theta}_0 E_\theta + \vec{\varphi}_0 E_\varphi$, $\vec{H} = \vec{\theta}_0 H_\theta + \vec{\varphi}_0 H_\varphi$.

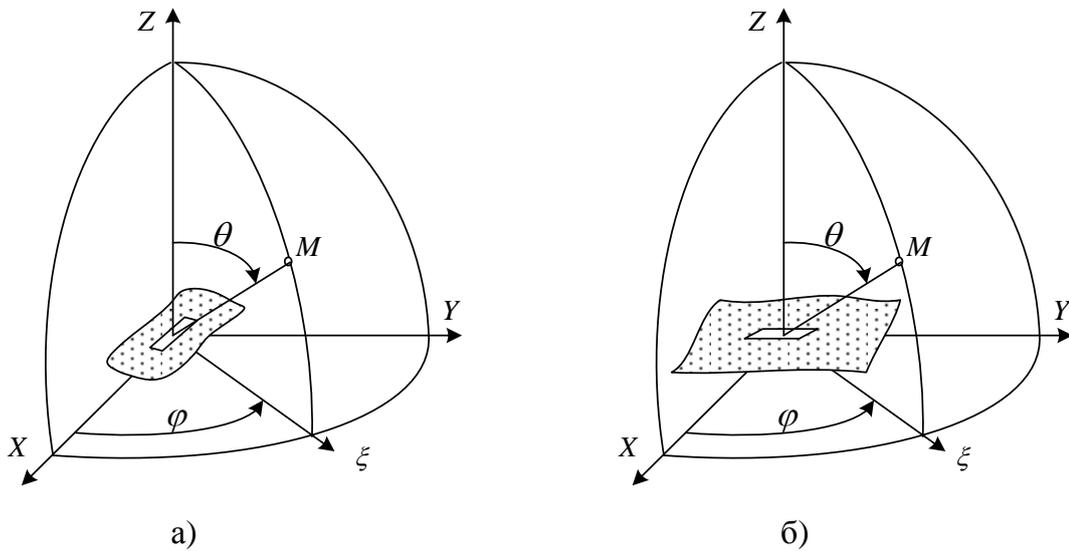


Рис. 2.3

Модули комплексных амплитуд отдельных составляющих при ориентации излучателя вдоль оси OX или оси OY определяются соотношениями:

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\varphi m}| = B |\cos \theta \cos \varphi|, |\dot{E}_{\theta m}| = B |\sin \varphi|; \\ |\dot{H}_{\varphi m}| = (B/W_0) |\sin \varphi|, |\dot{H}_{\theta m}| = (B/W_0) |\cos \theta \cos \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 2.3а,} \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\varphi m}| = B |\cos \theta \sin \varphi|, |\dot{E}_{\theta m}| = B |\cos \varphi|; \\ |\dot{H}_{\varphi m}| = (B/W_0) |\cos \varphi|, |\dot{H}_{\theta m}| = (B/W_0) |\cos \theta \sin \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 2.3б.} \quad (2.11)$$

Модули полных векторов через их составляющие определяются соотношениями:

$$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\dot{E}_{\theta m}|^2 + |\dot{E}_{\varphi m}|^2}, |\dot{H}_m| = \sqrt{|\dot{H}_{\theta m}|^2 + |\dot{H}_{\varphi m}|^2}. \quad (2.12)$$

2.3. Элементарная электрическая рамка

Рассмотрим виток, по которому течет гармонический электрический ток $i = I_p \cos \omega t$ (рис. 2.4а). Размеры витка таковы, что выполняются условия: $ka \ll 1$; $a \ll \lambda$; $S \ll \lambda^2$, где $k = 2\pi/\lambda$; a – радиус витка; S – площадь витка. Считаем, что амплитуда и фаза тока во всех точках витка одинаковы. Такой виток принято называть элементарной электрической рамкой.

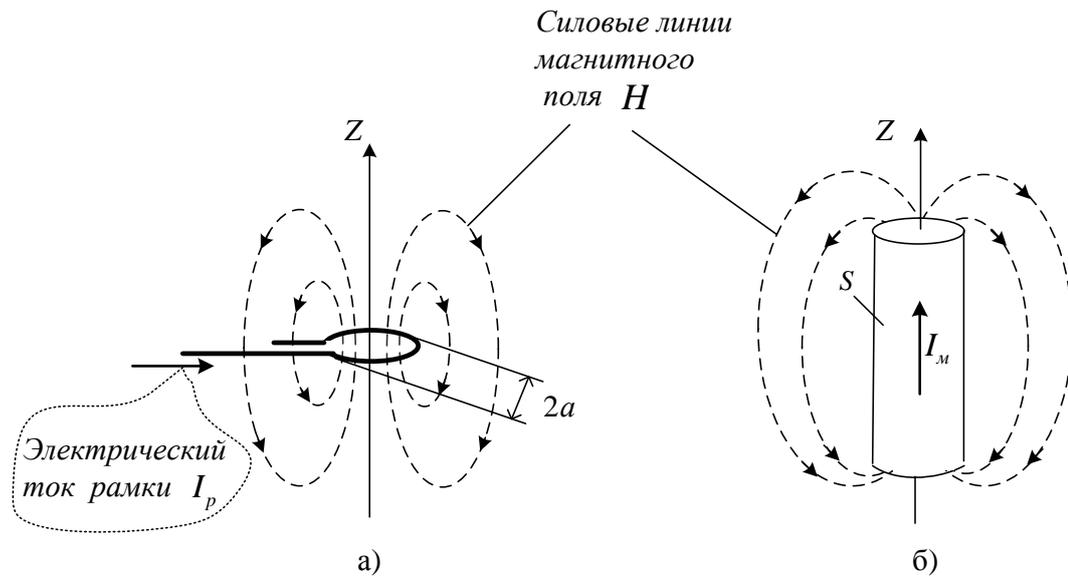


Рис. 2.4

Вокруг рамки создается электромагнитное поле. При этом линии магнитного поля охватывают текущий по витку ток. Сравним рис. 2.4а и рис. 2.4б, повторяющий рис. 2.1б, на котором дана структура поля элементарного магнитного излучателя. Сравнение показывает, что картина силовых линий магнитного поля элементарной электрической рамки и элементарного магнитного излучателя, ось которого перпендикулярна плоскости рамки и проходит через ее центр, совершенно идентичны. Из сказанного следует важный вывод: направленные свойства элементарной электрической рамки и эквивалентного ей элементарного магнитного излучателя одинаковы.

При ориентации плоскости рамки перпендикулярно оси Z (рис. 2.5) комплексные амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей в дальней зоне определяется выражениями:

$$\vec{E}_m = -\vec{\varphi}_0 \dot{E}_{\varphi m} = -\vec{\varphi}_0 j (W_0 I_p l_\delta / 2r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (2.13)$$

$$\vec{H}_m = \vec{\theta}_0 \dot{H}_{\theta m} = \vec{\theta}_0 j (I_p l_\delta / 2r\lambda) \sin \theta e^{-jkr}, \quad (2.14)$$

где

I_p – амплитуда электрического тока возбуждения рамки;

$l_\delta = 2\pi S / \lambda$ – действующая длина рамки;

S – площадь рамки;

r – расстояние от центра рамки до точки наблюдения;

λ – длина волны;

θ – угол между осью эквивалентного магнитного излучателя и направлением на точку наблюдения;

W_0 – характеристическое сопротивление свободного пространства.

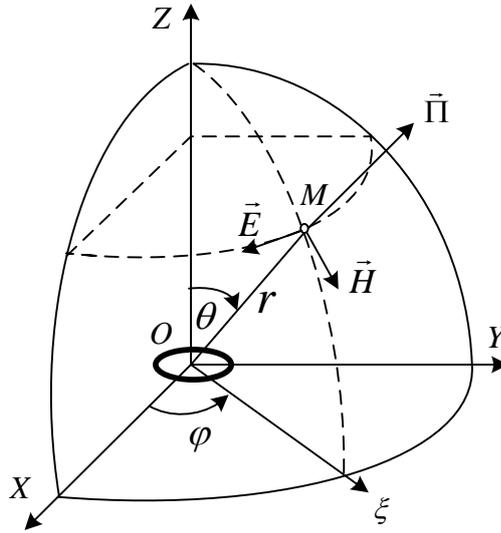


Рис. 2.5

Излучаемая электромагнитная волна имеет линейную поляризацию. Мгновенное значение вектора Пойнтинга (вектор \vec{P} на рис. 2.5) определяется выражением $\vec{P} = [\vec{E}, \vec{H}]$.

Все сказанное относится к рамке любой формы, так как в случае очень малых размеров рамки ($S \ll \lambda^2$) форма витка не влияет на структуру поля в дальней зоне.

Выражение $\dot{E}_{\varphi m}$, входящее в (2.13) можно записать в виде трех множителей: постоянного, не зависящего от направления на точку наблюдения ($C = W_0 I_p l_0 / 2r\lambda$), множителя, зависящего от направления на точку наблюдения $\sin \theta$, и фазового множителя $-je^{-jkr}$. С учетом этого формулы (2.13) и (2.14) для свободного пространства примут вид:

$$\dot{E}_m = -\vec{\varphi}_0 C \sin \theta j e^{-jkr}, \quad (2.15)$$

$$\dot{H}_m = \vec{\theta}_0 (C/W_0) \sin \theta j e^{-jkr}. \quad (2.16)$$

Сравнение формул (2.15), (2.16) для элементарной электрической рамки и (1.6), (1.7) для элементарного электрического излучателя показывает, что направленные свойства элементарной электрической рамки и элементарного электрического излучателя совершенно идентичны.

Главными плоскостями для элементарной электрической рамки (рис. 2.5) будут: любая меридиональная плоскость, проходящая через нормаль к плоскости рамки, например, плоскости $ZOX, ZOY, ZO\xi$, а также экваториальная плоскость XOY , содержащая плоскость рамки. В рассматриваемом случае меридиональная плоскость является H – плоскостью, а экваториальная — E – плоскостью. Следует обратить внимание на следующее: меридиональная плоскость стала H – плоскостью (у элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) она была E – плоскостью), а экваториальная плоскость стала E – плоскостью (у элементарного электрического излучателя (рис. 1.2) она была H – плоскостью).

Нормированная амплитудная характеристика направленности элементарной электрической рамки в меридиональной плоскости по-прежнему описывается функцией $F(\theta) = |\sin \theta|$, а в экваториальной — $F(\varphi) = \text{const} = 1$. Нормированные амплитудные диаграммы направленности в полярной и прямоугольной системе координат, пространственная амплитудная диаграмма направленности соответствуют диаграммам, приведенным на рис. 1.3, рис. 1.4 и рис. 1.5. Вполне очевидно, что и максимальный коэффициент направленного действия элементарной электрической рамки равен 1,5, т.е. в точности равен значению аналогичного параметра для элементарного электрического излучателя и элементарной излучающей щели.

В том случае, когда электрическая рамка ориентирована в плоскости ZOY (рис. 2.6а) или в плоскости ZOX (рис. 2.6б), структура её поля в волновой зоне будет характеризоваться составляющими $\vec{E} = \vec{\theta}_0 E_\theta + \vec{\varphi}_0 E_\varphi$, $\vec{H} = \vec{\theta}_0 H_\theta + \vec{\varphi}_0 H_\varphi$.

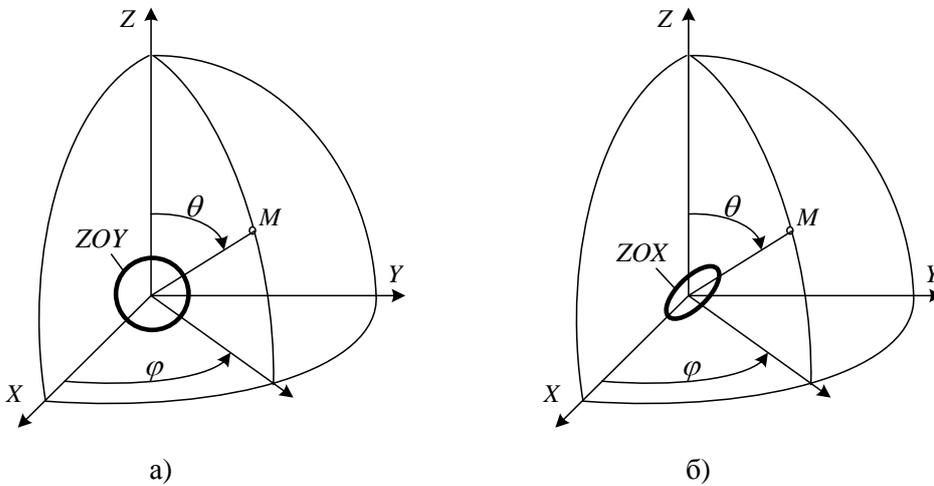


Рис. 2.6

При ориентации плоскости рамки нормально оси OX или оси OY модули комплексных амплитуд отдельных составляющих определяются соотношениями:

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\varphi m}| = C |\cos \theta \cos \varphi|, |\dot{E}_{\theta m}| = C |\sin \varphi|; \\ |\dot{H}_{\varphi m}| = (C/W_0) |\sin \varphi|, |\dot{H}_{\theta m}| = (C/W_0) |\cos \theta \cos \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 2.6а,} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} |\dot{E}_{\varphi m}| = C |\cos \theta \sin \varphi|, |\dot{E}_{\theta m}| = C |\cos \varphi|; \\ |\dot{H}_{\varphi m}| = (C/W_0) |\cos \varphi|, |\dot{H}_{\theta m}| = (C/W_0) |\cos \theta \sin \varphi| \end{cases} \quad \text{— рис. 2.6б.} \quad (2.18)$$

Модули полных векторов через их составляющие определяются соотношениями:

$$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\dot{E}_{\theta m}|^2 + |\dot{E}_{\varphi m}|^2}, |\dot{H}_m| = \sqrt{|\dot{H}_{\theta m}|^2 + |\dot{H}_{\varphi m}|^2}. \quad (2.19)$$

3. ЭЛЕМЕНТ ГЮЙГЕНСА

3.1. Определение

Электромагнитные волны излучателей, рассмотренных нами в предыдущих разделах, являются поперечными. Это значит, что векторы электрического и магнитного поля волны перпендикулярны направлению распространения и касательны к волновому фронту. Если мысленно выделить на поверхности фронта плоской волны, распространяющейся вдоль оси Z , элементарный участок $\Delta S = l_x l_y$ (рис. 3.1а), то векторы электрического и магнитного полей волны будут тангенциальны к площадке и взаимно перпендикулярны (рис. 3.1б).

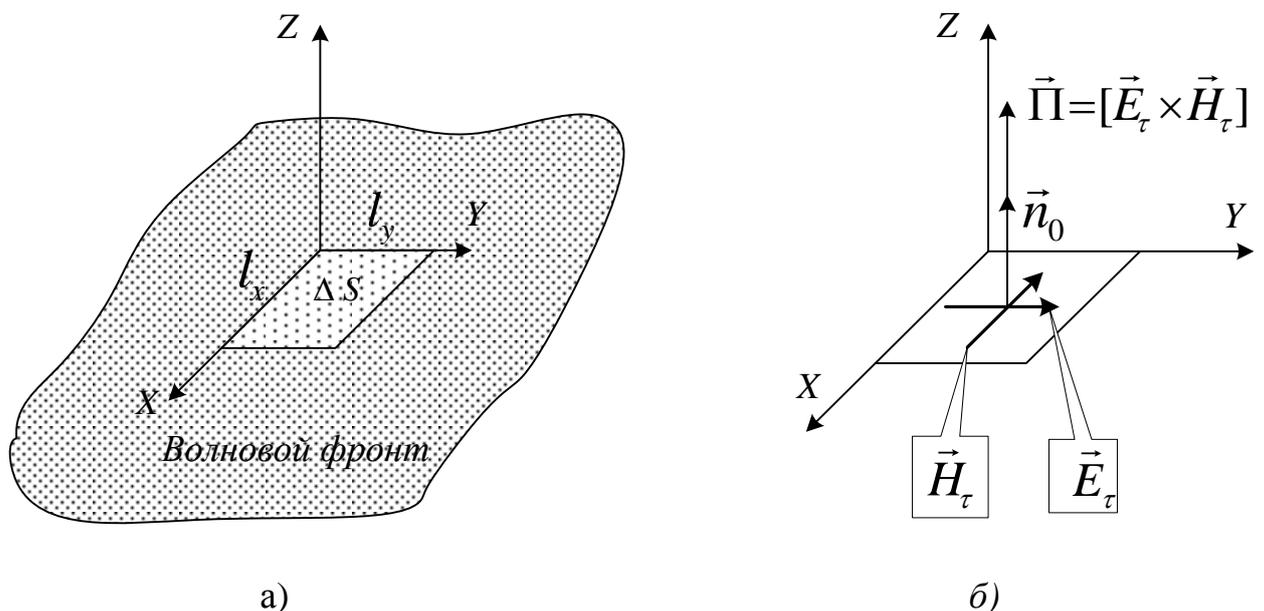


Рис. 3.1

Наличие тангенциальной составляющей магнитного поля на некоторой поверхности позволяет считать любой элементарный участок этой поверхность элементарным электрическим излучателем. Аналогично, тангенциальная составляющая электрического поля на элементарной поверхности является признаком существования элементарного магнитного излучателя. Векторы плотности электрического и магнитного токов (рис. 3.2а) определяются формулами:

$$\vec{\sigma}_S^{\text{э}} = [\vec{n}_0, \vec{H}_\tau] , \tag{3.1}$$

$$\vec{\sigma}_S^{\text{м}} = -[\vec{n}_0, \vec{E}_\tau] . \tag{3.2}$$

Следовательно, элементарный участок волнового фронта — элемент Гюйгенса — можно рассматривать как совокупность взаимно перпендикулярных элементарных электрического и магнитного излучателей, центры которых расположены в одной точке (центре элементарного участка ΔS). Излучатели ориентированы в пространстве так, что их оси составляют угол 90° с направлением распространения волны, определяемом вектором $\vec{\Pi}$ — рис. 3.2б.

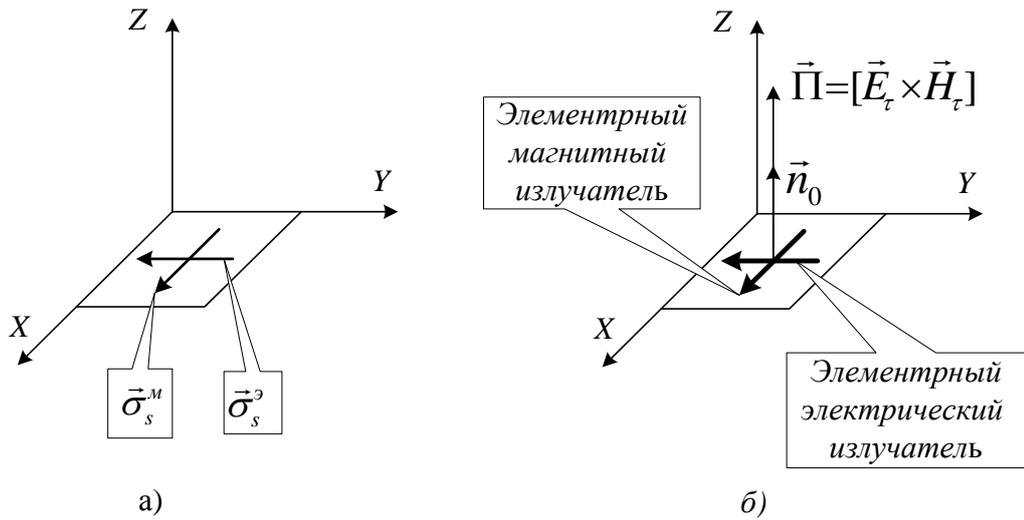


Рис. 3.2

Таким образом, элемент Гюйгенса — гипотетический излучатель, соответствующий бесконечно малому элементу волнового фронта плоской электромагнитной волны линейной поляризации. Элемент Гюйгенса вводится в теорию антенн в связи с применением принципа эквивалентных поверхностных токов (электрического и магнитного) — аналога известного из оптики принципа Гюйгенса.

3.2 Структура поля и направленные свойства

Совокупность двух элементарных излучателей (рис. 3.3) усложняет структуру результирующего поля по сравнению со структурой поля каждого излучателя в отдельности.

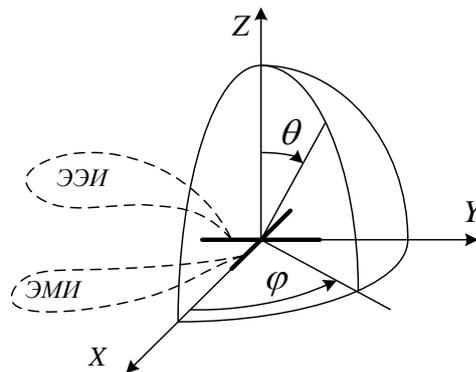


Рис. 3.3

В соответствии с формулами (1.10) и (2.10) в произвольной точке дальней зоны с координатами θ, φ, r в общем случае каждый излучатель создает по две составляющие напряженности электрического и магнитного поля. При определении результирующего поля эти составляющие должны соответствующим образом суммироваться. Можно показать, что комплексные амплитуды составляющих напряженности электрического поля определяются следующими формулами:

$$\dot{\vec{E}}_{1m} = \vec{\theta}_0 \dot{E}_{\theta m} = \vec{\theta}_0 j(E_\tau \Delta S / 2r\lambda)(1 + \cos \theta) \sin \varphi e^{-jkr}, \quad (3.3)$$

$$\dot{\vec{E}}_{2m} = \vec{\varphi}_0 \dot{E}_{\varphi m} = \vec{\varphi}_0 j(E_\tau \Delta S / 2r\lambda)(1 + \cos \theta) \cos \varphi e^{-jkr}. \quad (3.4)$$

Если ввести обозначение $G = E_\tau \Delta S / 2r\lambda$, то амплитудные ненормированные характеристики направленности этих составляющих будут иметь вид:

$$|\dot{E}_{1m}| = |f_1(\theta, \varphi)| = G(1 + \cos \theta)|\sin \varphi|, \quad (3.5)$$

$$|\dot{E}_{2m}| = |f_2(\theta, \varphi)| = G(1 + \cos \theta)|\cos \varphi|. \quad (3.6)$$

Из рис. 3.3 нетрудно установить, какие плоскости будут главными. Плоскость ZOY ($\varphi = 90^\circ$) является E – плоскостью, как для элементарного электрического излучателя, так и для элементарного магнитного излучателя. Плоскость ZOX ($\varphi = 0^\circ$) является H – плоскостью, как для элементарного электрического излучателя, так и для элементарного магнитного излучателя. При этом в каждой из главных плоскостей остается по одной составляющей. В E – плоскости сохраняется только составляющая $|\dot{E}_{\theta m}| = G(1 + \cos \theta)$, а в H – плоскости остается составляющая $|\dot{E}_{\varphi m}| = G(1 + \cos \theta)$. Следовательно, нормированные амплитудные характеристики направленности элемента Гюйгенса в главных плоскостях одинаковы и определяются формулой:

$$F(\theta) = (1 + \cos \theta)/2. \quad (3.7)$$

Нормированная амплитудная диаграмма направленности, рассчитанная по формуле (3.7), имеет форму кардиоиды и показана на рис. 3.4.

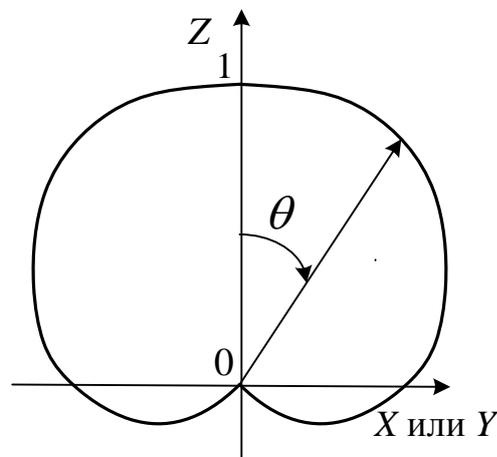


Рис. 3.4

Видно, что, элемент Гюйгенса обладает однонаправленными свойствами: максимум излучения перпендикулярен поверхности элемента и направлен в сторону движения волны; в обратном направлении — излучения нет. В любой плоскости, проходящей через ось Z , но отличной от главных, нормированная диаграмма направленности суммарного поля двух составляющих будет иметь такой же вид. Это вывод следует из формул (3.5) и (3.6) с учетом того, что

$$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\dot{E}_{1m}|^2 + |\dot{E}_{2m}|^2}. \quad (3.8)$$

Другими словами, пространственная диаграмма направленности $F(\theta, \varphi)$ представляет собой тело вращения кардиоиды вокруг оси Z .

В плоскости XOY элемент Гюйгенса не обладает направленными свойствами.

Эффект односторонней направленности элемента Гюйгенса можно пояснить простыми рассуждениями с помощью серии диаграмм, приведенных на рис. 3.5. Читателю предлагается сделать это самостоятельно.

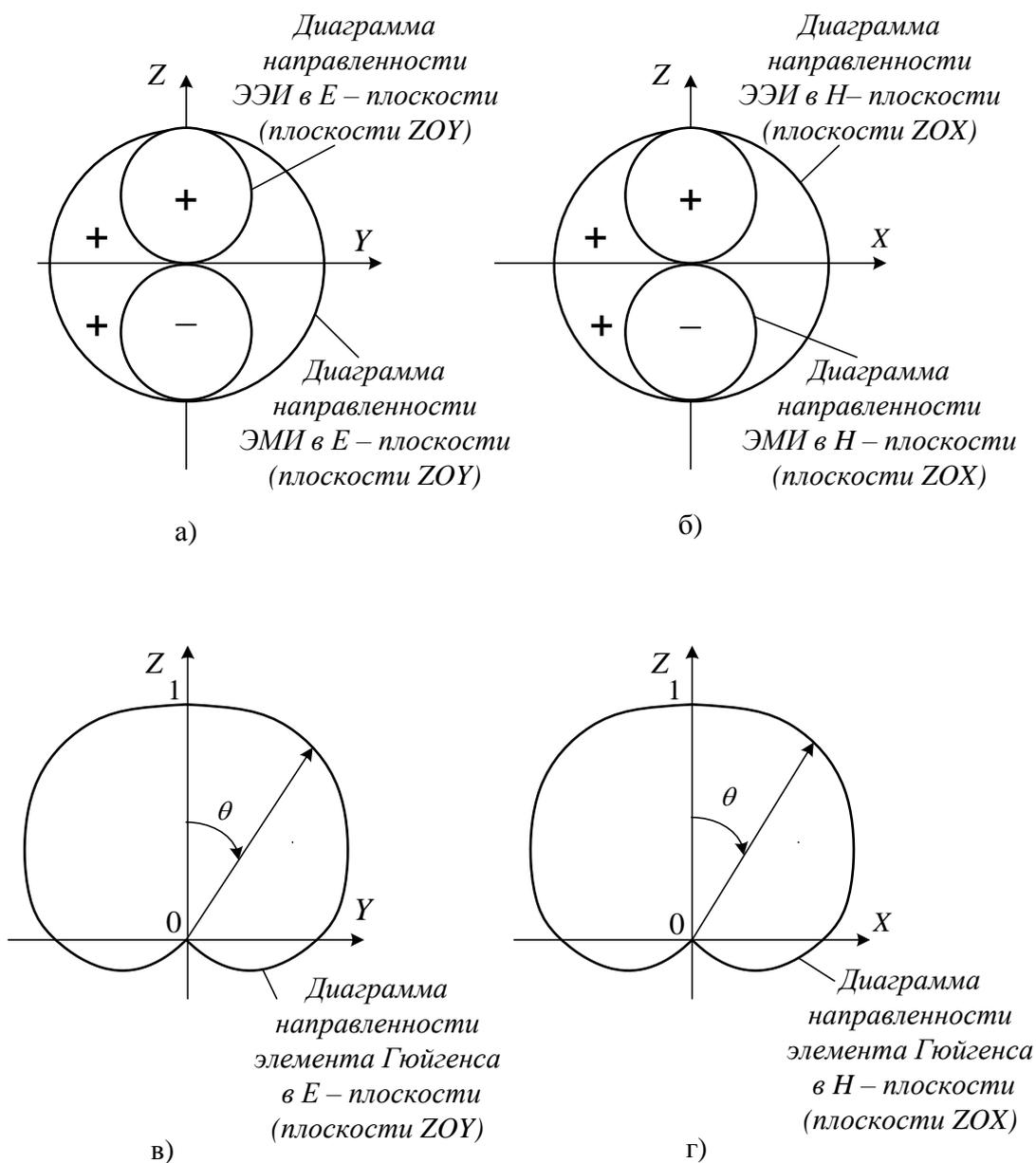


Рис. 3.5

3.3 Коэффициент направленного действия

В разделе 1.5 подробно рассматривался вопрос о КНД элементарного электрического излучателя. Было показано, что максимальное значение КНД равно 1,5. Полная идентичность направленных свойств элементарного электрического излучателя и элементарного магнитного излучателя позволяет сказать, что эти излучатели имеют одинаковый КНД. Другими словами, физические реализации элементарного магнитного излучателя — элементарный щелевой излучатель и элементарная электрическая рамка имеют максимальное значение КНД, равное 1,5.

В теории антенн для определения максимального значения КНД антенны очень часто используется формула

$$D_0 = D_{max} = 4\pi / \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi, \quad (3.8)$$

где $F(\theta, \varphi)$ — нормированная амплитудная характеристика направленности антенны. Координаты θ, φ и направления их отсчета соответствуют приведенным, например, на рис. 1.2, рис. 2.2, рис. 2.5, рис. 3.3.

Если в формулу (3.8) подставить функцию $F(\theta, \varphi) = \sin \theta$, соответствующую нормированной амплитудной характеристике направленности элементарного электрического или элементарного магнитного излучателей, то легко убедиться, что $D_0 = 1,5$.

Подстановка в (3.8) функции $F(\theta) = (1 + \cos \theta)/2$, определяющей нормированную амплитудную диаграмму направленности элемента Гюйгенса, даст $D_0 = 3,0$. Следовательно, значение КНД элемента Гюйгенса в два раза больше значения КНД элементарного электрического или магнитного излучателей. Это и понятно: амплитудная диаграмма направленности элемента Гюйгенса, являющегося совокупностью двух элементарных излучателей (рис. 3.4), имеет одностороннюю направленность.

Для вычисления интеграла из формулы (3.8) в тех случаях, когда амплитудные нормированные характеристики направленности не описываются простыми функциями, прибегают к численному интегрированию с использованием персональных компьютеров и специальных программных продуктов. Один из прекрасных пакетов подобного типа — это Mathcad 14, разработанный для студентов и инженеров (русская версия — [4]).

4. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

4.1. О размерностях некоторых физических величин электромагнитного поля

В системе единиц СИ напряженность электрического поля имеет размерность вольт на метр — В/м, напряженности магнитного поля — ампер на метр — А/м. Вектор Пойнтинга имеет размерность ватт на квадратный метр — Вт/м². При этом размерности величин, входящих в формулы: амплитуда тока — амперы — А; амплитуда напряжения — вольты — В, геометрические размеры излучателя, расстояние и длина волны — метры — м; характеристическое сопротивление свободного пространства — омы — Ом.

Если используются иные размерности, например, для тока миллиамперы или микроамперы, то размерностью напряженности электрического поля будет милливольт на метра — мВ/м или микровольт на метр — мкВ/м, а размерностью напряженности магнитного поля — миллиампер на метр — мА/м или микроампер на метр — мкА/м. Аналогично для плотности потока энергии (вектора Пойнтинга) можно говорить о размерностях милливольт на метр квадратный — мВт/м² или микроватт на метр квадратный — мкВт/м². При решении задач или выполнении расчетов об этом всегда следует помнить.

Иногда характеристики поля выражаются в децибелах. Децибел — специфическая единица, не схожая ни с одной из тех, с которыми приходится встречаться в повседневной практике. Децибел — не физическая величина, а математическое понятие. В этом отношении у децибел есть некоторое сходство с процентами. Как и проценты, децибелы безразмерны и служат для сравнения двух одноименных величин, в принципе самых различных, независимо от природы. Но если проценты выражают численное значение какой-то величины сравнительно с целым значением, принятым за единицу (100%), то в основе децибела лежит более широкое понятие, характеризующее в общем случае отношение двух независимых, но, конечно, одноименных значений величин.

Например, если сравнивать напряженность электрического поля E , выраженную в В/м, с 1 В/м, то отношение $20\lg(E/1)$ будет децибельной мерой напряженности поля — $E_{\text{дБ/В/м}}$, то есть $E_{\text{дБ/В/м}} = 20\lg(E)$.

Другой пример, если сравнивать плотность потока энергии Π , выраженную в Вт/см², с 1 Вт/см², то отношение $10\lg(\Pi/1)$ будет децибельной мерой плотности потока энергии — $\Pi_{\text{дБ/Вт/см}^2}$, то есть $\Pi_{\text{дБ/Вт/см}^2} = 10\lg(\Pi)$. Следует обратить внимание на то, что переход к децибельной мере для напряженности электрического поля и для плотности потока энергии осуществляется по разным формулам (разные множители перед логарифмом — для напряженности поля 20, для плотности потока энергии 10). Это объясняется просто — физическая величина Π является энергетической — она пропорциональна квадрату напряженности электрического поля E .

По аналогии не составит труда понять смысл размерностей напряженности электрического поля в дБ/мВ/м, дБ/мкВ/м, а также плотности потока энергии в дБ/мВт/м², дБ/мВт/см², дБ/мкВт/см². В общем случае необходимость использования тех или иных размерностей обычно определяется спецификой решаемой задачи.

4.2. Задачи

1. Определить амплитуды всех составляющих напряженности электрического и магнитного полей элементарного электрического излучателя в точке пространства с координатами: $r = 1000$ м, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$. Излучатель ориентирован вдоль оси X (рис. 4.1а). Амплитуда тока, возбуждающего излучатель, равна 1 А, частота 300 МГц, длина излучателя 10 см. Значения амплитуд напряженности электрического поля выразить в децибелах относительно 1 мВ/м — магнитного поля — в децибелах относительно 1 мА/м.

(Ответ: $E_{\theta m} = 16,5$ дБ/мВ/м, $E_{\varphi m} = 24,3$ дБ/мВ/м,
 $H_{\varphi m} = -35,05$ дБ/мА/м, $H_{\theta m} = -27,3$ дБ/мА/м.).

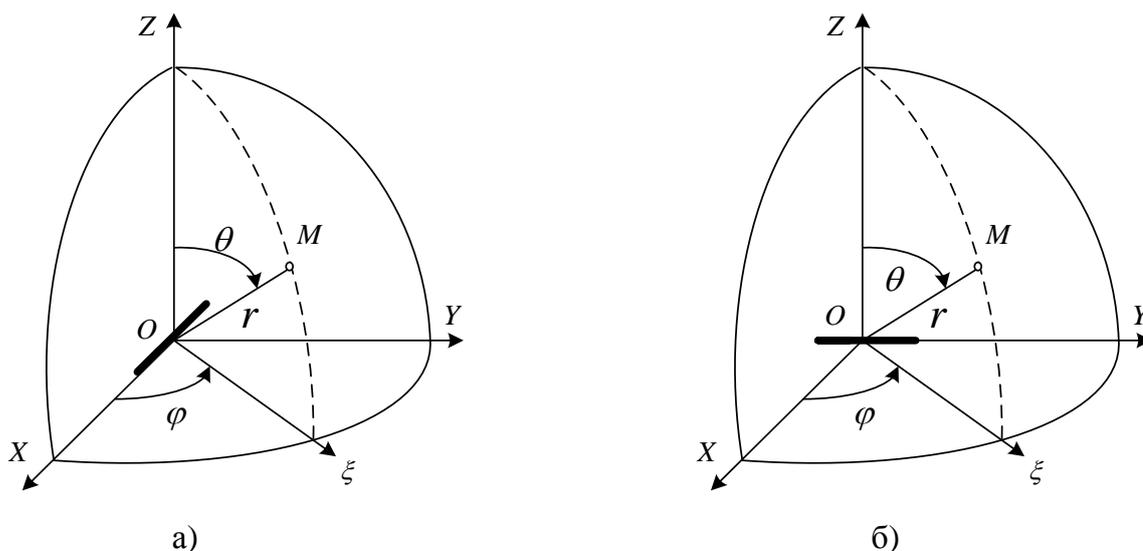


Рис. 4.1

2. Элементарный электрический излучатель ориентирован вдоль оси Y (рис. 4.1б). Определить значения амплитуд составляющих напряженности электрического поля $E_{\theta m}$, $E_{\varphi m}$ и составляющих напряженности магнитного поля $H_{m\theta}$, $H_{m\varphi}$ в расчетной точке с координатами: $r = 1000$ м, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$. Амплитуда тока, возбуждающего излучатель, равна 1 А, частота 300 МГц, длина излучателя 10 см. Значения амплитуд напряженности электрического поля выразить в децибелах относительно 1 мВ/м — магнитного поля — в децибелах относительно 1 мА/м.

(Ответ: $E_{\theta m} = 21,3$ дБ/мВ/м, $E_{\varphi m} = 19,5$ дБ/мВ/м,
 $H_{\varphi m} = -30,3$ дБ/мА/м, $H_{\theta m} = -32,04$ дБ/мА/м.).

3. Элементарный электрический излучатель ориентирован вдоль оси X (рис. 4.1а). Амплитуда тока, возбуждающего излучатель, равна 1 А, частота 300 МГц, длина излучателя 10 см. Определить азимутальный угол φ точки наблюдения поля, для которого значения амплитуд составляющих напряженности электрического поля $E_{\theta m}, E_{\varphi m}$ окажутся равными, если угол места $\theta = 60^\circ$. Определить значения искомых амплитуд при $r = 1000$ м.

(Ответ: $\varphi = 26,6^\circ, E_{\theta m} = E_{\varphi m} = 8,43 \cdot 10^{-3}$ В/м.).

4. Определить значение мощности излучения элементарного электрического излучателя, ориентированного вдоль оси Z , если известно, что на расстоянии 500 м от него максимальное значение амплитуды напряженности электрического поля равно 0,0182 В/м.

(Ответ: $P_{\Sigma} = 0,92$ Вт).

5. Длина элементарного электрического излучателя в сравнении с длиной волны последовательно изменяется в пределах от $l/\lambda = 0,01$ до $l/\lambda = 0,1$ шагом 0,01. Рассчитать и построить график зависимости сопротивления излучения излучателя от l/λ , а также график изменения амплитуды тока, поддерживающего постоянство значения излучаемой мощности на уровне 5 Вт.

6. Определить азимутальный угол φ точки наблюдения, при котором амплитуды составляющих элементарного электрического излучателя $E_{\theta m}, E_{\varphi m}$ в точке наблюдения, имеющей координату $\theta = 60^\circ$ и находящейся в дальней зоне, будут равны между собой. Излучатель ориентирован вдоль оси Y (рис 4.1б). Амплитуда тока, который возбуждает излучатель, равна 1 А на частоте 300 МГц, длина излучателя 10 см. Определить значения искомых амплитуд на расстоянии 500 м.

(Ответ: $\varphi = 63,4^\circ, E_{\theta m} = E_{\varphi m} = 0,017$ В/м.).

7. Определить действующую длину элементарной излучающей рамки и её площадь, если известно, что на расстоянии 500 метров при амплитуде тока возбуждения 1 А на частоте 15 МГц максимальное значение амплитуды напряженности поля равна 1 мВ/м.

(Ответ: $l_d = 0,053$ м, $S = 0,169$ м².).

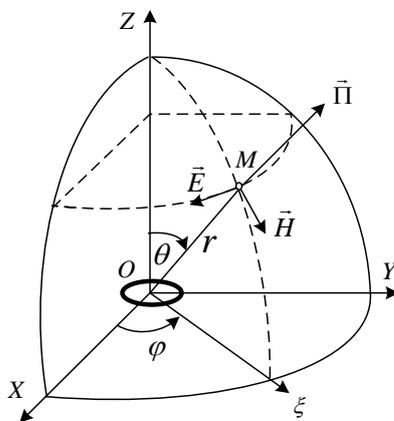


Рис. 4.2

8. Плоскость элементарной рамки, возбужденной электрическим током, находится в плоскости XOY (рис. 4.2). Амплитуда тока равна $0,1$ А, частота 3 ГГц, площадь рамки $0,1$ м². Определить максимальное значение амплитуды напряженности электрического поля на расстоянии 2000 метров от центра рамки. Найденное значение амплитуды напряженности электрического поля выразить в В/м и децибелах относительно 1 мВ/м.

(Ответ: $E_{\varphi m} = 0,592$ В/м, $E_{\varphi m} = 55,5$ дБ/мВ /м.)

9. Ось магнитного излучателя, роль которого выполняет одновитковая проволочная рамка, ориентирована вдоль оси Y (рис. 4.3). Амплитуда тока, возбуждающего рамку на частоте 500 МГц, равна $0,2$ А. Площадь рамки равна $0,6$ м². Определить азимутальную координату точки наблюдения поля в пространстве на расстоянии 1000 метров, где амплитуды составляющих напряженности электрического поля при $\theta = 45^\circ$ имеют одинаковые значения. Определить в децибелах значение амплитуд этих составляющих в сравнении с 1 В/м.

(Ответ: $\varphi = 54,7^\circ$, $E_{\theta m} = E_{\varphi m} = -12,84$ дБ/В /м.)

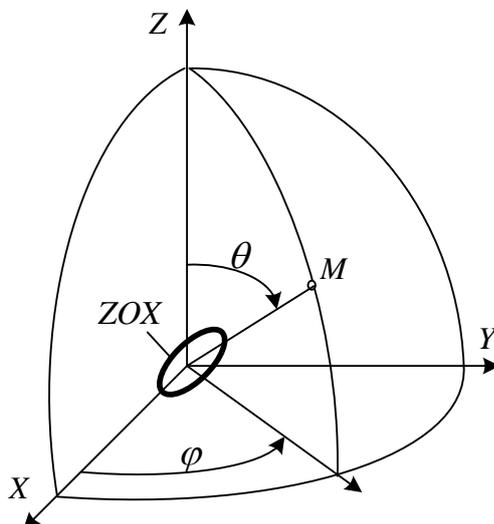


Рис. 4.3

10. Два идентичных элементарных электрических излучателя находятся в плоскости XOY . Один из них ориентирован вдоль оси X , а другой — вдоль оси Y (рис. 4.4) Их фазовые центры находятся в центре сферической системы координат. Определить отношение амплитуд токов, возбуждающих излучатели, если в точке наблюдения поля с угловыми координатами $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 35^\circ$ значения амплитуд полных векторов напряженности электрического поля равны между собой.

(Ответ: $I_x/I_y = 1,12$).

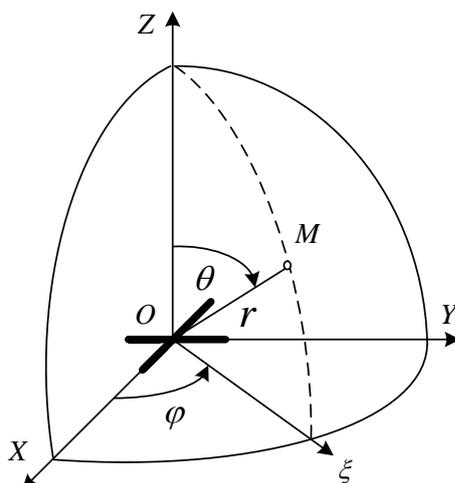


Рис. 4.4

11. Два идентичных элементарных электрических излучателя находятся в плоскости XOY . Один из них ориентирован вдоль оси X , а другой — вдоль оси Y (рис. 4.4). Их фазовые центры находятся в центре сферической системы координат. Определить отношение амплитуд токов, возбуждающих излучатели, если в точке наблюдения поля с азимутальной координатой $\varphi = 65^\circ$ значения амплитуд составляющих $E_{\theta m}$ напряженности электрического поля равны между собой.
(Ответ: $I_x/I_y = 2,145$).

12. Два идентичных элементарных электрических излучателя находятся в плоскости XOY . Один из них ориентирован вдоль оси X , а другой — вдоль оси Y (рис. 4.4). Их фазовые центры находятся в центре сферической системы координат. Определить отношение амплитуд токов, возбуждающих излучатели, если в точке наблюдения поля с азимутальной координатой $\varphi = 65^\circ$ значения амплитуд составляющих $E_{\varphi m}$ напряженности электрического поля равны между собой.

(Ответ: $I_x/I_y = 0,466$).

13. Элементарный магнитный излучатель в виде щели ориентирован своей осью вдоль оси Z (рис. 4.5). Широкая сторона щели равна 10 см, узкая сторона щели равна 0,1 см. Амплитуда напряжения, возбуждающего щель на частоте 300 МГц, равна 100 В. Определить значения амплитуд составляющих поля $H_{\theta m}, E_{\varphi m}$ на расстоянии 100 м в точке пространства с угловой координатой $\theta = 30^\circ, \varphi = 90^\circ$.

(Ответ: $E_{\varphi m} = 0,05 \text{ В/м}, H_{\theta m} = 1,33 \cdot 10^{-4} \text{ А/м}$).

14. Определить проводимость излучения элементарной излучающей щели длиной $l = 10$ см при частоте возбуждения 1500 МГц.

(Ответ: $G = 5,56 \cdot 10^{-3} \text{ См}$).

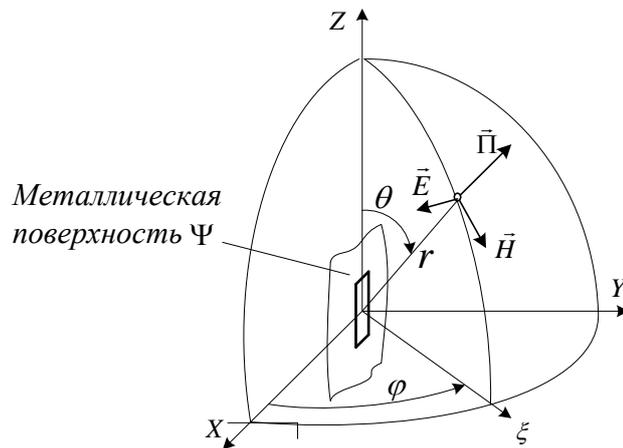


Рис. 4.5

15. Определить максимальное значение амплитуды полного вектора напряженности электрического поля излучающей системы, состоящей из элементарной излучающей рамки и элементарного электрического излучателя. Плоскость рамки совпадает с плоскостью XOY (рис. 4.6), а ее площадь равна 2 м^2 . Элементарный излучатель ориентирован перпендикулярно плоскости рамки и имеет длину $0,4 \text{ м}$. Амплитуды токов, возбуждающих рамку и излучатель равны 1 А , частоты 10 МГц . Фазовые центры элементарных излучателей совмещены с центром системы координат. Точка наблюдения поля находится на расстоянии 1000 м .

(Ответ: $E_{\theta m} = 3,64 \cdot 10^{-3} \text{ В/м}$).

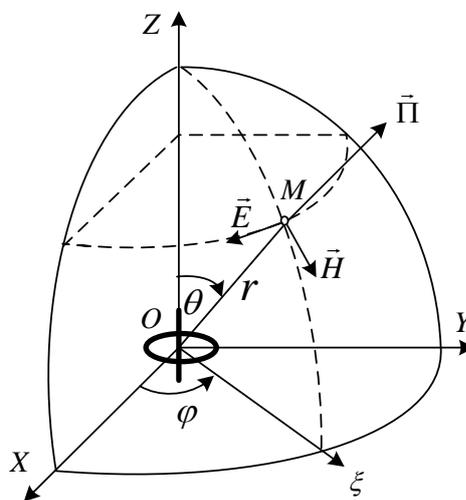


Рис. 4.6

16. Рассчитать модуль полного вектора напряженности электрического поля $|\vec{E}|$, для точки с координатами $(r = 1000 \text{ м}, \theta = 90^\circ, \varphi = 90^\circ)$. Излучающая система, состоит из элементарной излучающей рамки и элементарного электрического излучателя (рис. 4.6). Плоскость рамки совпадает с плоскостью XOY , а

ее площадь равна $0,02 \text{ м}^2$. Элементарный излучатель ориентирован перпендикулярно плоскости рамки и имеет длину $0,1 \text{ м}$. Амплитуды токов, возбуждающих рамку и излучатель равны 1 А , частоты 10 МГц . Фазовые центры элементарных излучателей совмещены с центром системы координат.

(Ответ: $|\vec{E}| = 0,63 \text{ мВ/м}$).

17. Рассчитать модуль полного вектора напряженности магнитного поля $|\vec{H}|$, для точки с координатами ($r = 1000 \text{ м}$, $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$). Излучающая система, состоит из элементарной излучающей рамки и элементарного электрического излучателя (рис. 4.6). Плоскость рамки совпадает с плоскостью XOY , а ее площадь равна $0,02 \text{ м}^2$. Элементарный излучатель ориентирован перпендикулярно плоскости рамки и имеет длину $0,1 \text{ м}$. Амплитуды токов, возбуждающих рамку и излучатель равны 1 А , частоты 10 МГц . Фазовые центры элементарных излучателей совмещены с центром системы координат.

(Ответ: $|\vec{H}| = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ мА/м}$).

18. Для области дальней зоны рассчитать нормированную амплитудную характеристику направленности $F(\theta)$ в плоскости XOZ и построить соответствующую ей нормированную амплитудную диаграмму направленности в полярной и прямоугольной системах координат для излучающей системы, состоящей из элементарной излучающей рамки и элементарного электрического излучателя. Плоскость рамки совпадает с плоскостью XOY . Элементарный электрический излучатель ориентирован перпендикулярно плоскости рамки (рис. 4.6).

19. Излучающая система, состоит из элементарной излучающей рамки и элементарного электрического излучателя (рис. 4.6). Амплитуды и частоты токов, возбуждающих рамку и излучатель равны, при этом значение частоты равно 10 МГц . Фазовые центры элементарных излучателей совмещены с центром системы координат. Точка наблюдения поля находится в дальней зоне. Плоскость рамки совпадает с плоскостью XOY (рис. 4.2), а ее площадь равна 2 м^2 . Элементарный излучатель ориентирован перпендикулярно плоскости рамки и имеет длину $0,4 \text{ м}$. Определить отношение амплитуд токов в рамке и в элементарном электрическом излучателе, при котором значения амплитуд напряженности поля рамки и излучателя в точке наблюдения, находящейся в дальней зоне, будут равны.

(Ответ: $I_p/I_{\text{ээл}} = 0,955$).

20. Элемент Гюйгенса расположен в плоскости XOY (рис. 4.7). Рассчитать его нормированную амплитудную характеристику направленности в плоскости ξOZ при $\varphi = 60^\circ$. Построить нормированную амплитудную диаграмму направленности в полярной системе координат.

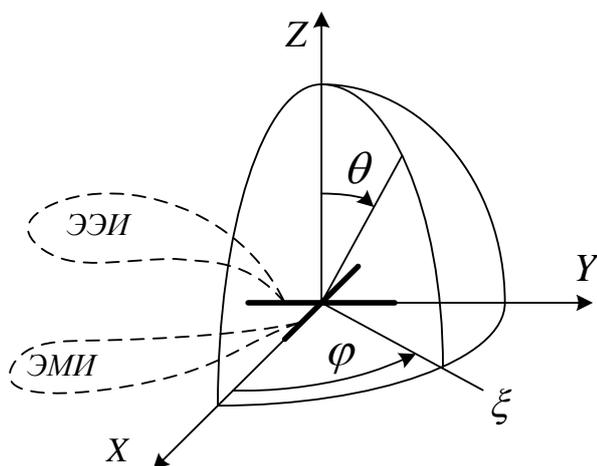


Рис. 4.7

21. Элементарный электрический излучатель длиной $l = 5$ см излучает в свободном пространстве электромагнитные волны длиной $\lambda = 5$ м. Мощность излучения 10 Вт. Определить значения амплитуд напряженности электрического и магнитного полей излучателя на расстоянии 1 км в секторе углов θ от 0° до 90° с шагом через 10° .

(Ответ: при $\theta = 30^\circ$ $E_{\theta m} = 0,015$ В/м, $H_{\phi m} = 3,98 \cdot 10^{-5}$ А/м).

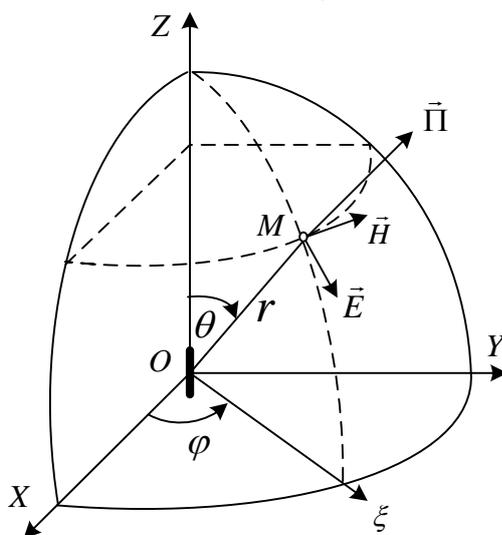


Рис. 4.8

22. Рассчитать и построить график значений амплитуд напряженности электрического поля, создаваемого элементарным электрическим излучателем в точках на расстояниях от 10 до 100 м с шагом 10 м в направлении, определяемом меридиональным углом $\theta = 30^\circ$. Излучатель ориентирован вдоль оси Z (рис 4.8). Значение амплитуды тока, возбуждающего излучатель, равна 1,0 А, частота 150 МГц, длина излучателя 0,2 м.

(Ответ: на расстоянии 100 м $E_{\theta m} = 0,094$ В/м).

23. Элементарный электрический излучатель находится в свободном пространстве. Определить ширину амплитудной нормированной диаграммы направленности излучателя в E плоскости в дальней зоне по уровню нулевого излучения и по уровню половинной мощности.

24. Элементарная излучающая рамка находится в свободном пространстве. Определить ширину нормированной амплитудной диаграммы направленности излучателя в H плоскости в дальней зоне по уровню нулевого излучения и по уровню половинной мощности.

25. Элементарная излучающая щель находится в свободном пространстве и ориентирована вдоль оси Y (рис. 4.9). Определить ширину диаграммы направленности излучателя в H плоскости в дальней зоне по уровню нулевого излучения и по уровню половинной мощности.

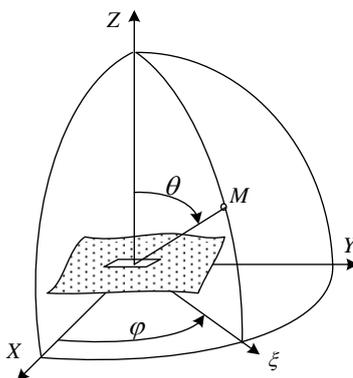


Рис. 4.9

4.3. Примеры решения задач

Задача 1. Определить модули полных векторов напряженности электрического и магнитного полей элементарного электрического излучателя в точке пространства с координатами: $r = 1000$ м, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$. Излучатель ориентирован вдоль оси X (рис. 4.10). Амплитуда тока, возбуждающего излучатель, равна 1 А, частота 300 МГц, длина излучателя 10 см.

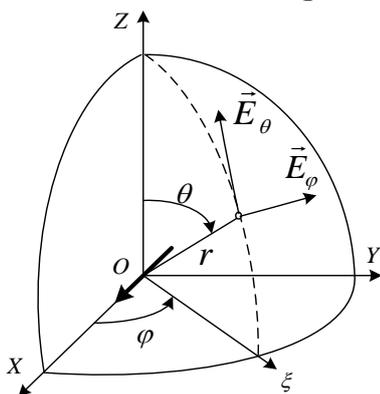


Рис. 4.10

Решение задачи

Векторы составляющих напряженности электрического поля показаны на рис. 4.10. Модуль полного вектора напряженности электрического поля определяется по первой из двух формул (1.11):

$$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\dot{E}_{\theta m}|^2 + |\dot{E}_{\varphi m}|^2}. \quad (4.1)$$

Модули составляющих под знаком корня находятся по формулам первой строки выражения (1.9):

$$|\dot{E}_{\theta m}| = A|\cos \theta \cos \varphi|, \quad (4.2)$$

$$|\dot{E}_{\varphi m}| = A|\sin \varphi|, \quad (4.3)$$

где

$$A = W_0 I_0 l / 2r\lambda \quad (4.4)$$

– коэффициент, который не зависит от угловых координат (см. раздел 1.4) и выражается через следующие физические величины:

I_0 – амплитуда тока в излучателе (А);

l – длина излучателя (м);

r – расстояние от излучателя до точки наблюдения (м);

λ – длина волны (м);

$W_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi = 377$ Ом – характеристическое сопротивление свободного пространства.

Подстановка (4.2), (4.3) и (4.4) в (4.1) позволяет получить выражение,

$|\dot{E}_m| = \sqrt{|\cos \theta \cos \varphi|^2 + |\sin \varphi|^2}$, которое после простых преобразований приводится к виду

$$|\dot{E}_m| = A\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2(\sin \theta)^2}. \quad (4.5)$$

Согласно условиям задачи имеем: $I_0 = 1$ А, $l = 0,1$ м, $r = 1000$ м, $\lambda = c/f = 1$ м (c – скорость света $3 \cdot 10^8$ м/с, f – частота тока возбуждения 300 МГц), $W_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi$ Ом, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 60^\circ$.

Подставим исходные данные в формулу (4.5) и выполним вычисления

$$\begin{aligned} |\dot{E}_m| &= (W_0 I_0 l / 2r\lambda) \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2(\sin \theta)^2} = \\ &= (377 \cdot 1 \cdot 0,1 / 2 \cdot 1000 \cdot 1) \sqrt{1 - (\sin 45^\circ)^2(\cos 60^\circ)^2} = 0,018 \text{ В/м} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Расчет модуля полного вектора напряженности магнитного поля не представляет труда, если учесть [1], что

$$W_0 = |\dot{E}_m| / |\dot{H}_m|. \quad (4.7)$$

Из формулы (4.7) следует

$$|\dot{H}_m| = |\dot{E}_m| / W_0. \quad (4.8)$$

В результате имеем

$$|\dot{H}_m| = 0,018 / 377 = 4,775 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}.$$

Задача 2. Построить нормированную амплитудную диаграмму направленности полного вектора напряженности электрического поля элементарного электрического излучателя в плоскости $XO\xi$ при $r = 1000$ м, $\varphi = 45^\circ$. Излучатель ориентирован вдоль оси X (рис. 4.10). Амплитуда тока, возбуждающего излучатель, равна 1 А, частота 300 МГц, длина излучателя 10 см.

Решение задачи

Модуль комплексной амплитуды полного вектора напряженности электрического поля элементарного электрического излучателя определяется выражением (4.5) — $|\dot{E}_m| = A\sqrt{1 - (\cos \varphi)^2(\sin \theta)^2}$. Коэффициент A не зависит от координат, поэтому ненормированная амплитудная характеристика направленности в плоскости $XO\xi$ при $\varphi = 45^\circ$ описывается выражением $f(\theta, \varphi = 45^\circ) = \left| \sqrt{1 - (\cos 45^\circ)^2(\sin \theta)^2} \right|$.

На рис. 4.11 приведено решение поставленной задачи с использованием системы Mathcad 14 [4].

Если в исходных данных вместо угла $\varphi = 45^\circ$ задать угол $\varphi = 0^\circ$, то плоскость $XO\xi$ (рис. 4.10) совпадет с плоскостью XOZ , которая является одной из главных плоскостей излучателя — E – плоскостью. Следовательно, амплитудная диаграмма направленности будет в точности соответствовать диаграмме, приведенной на рис. 1.3а (для полярной системы координат) или на рис. 1.4а (для прямоугольной системы координат).

При переходе к углу $\varphi = 90^\circ$, плоскость $XO\xi$ совпадет с плоскостью YOZ , которая является одной из главных плоскостей излучателя — H – плоскостью. Амплитудная диаграмма направленности будет в точности соответствовать диаграмме, приведенной на рис. 1.4а (для полярной системы координат) или на рис. 1.4б (для прямоугольной системы координат).

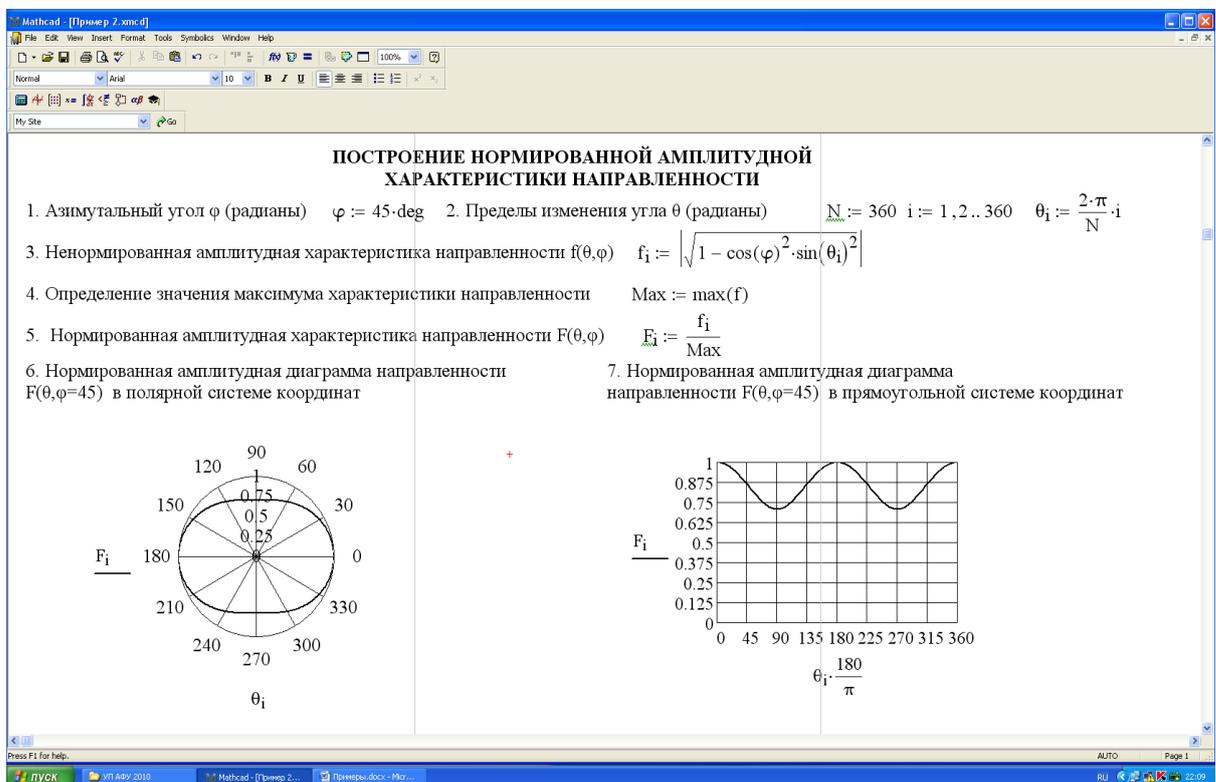


Рис. 4.11

5. ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как ориентированы в пространстве главные плоскости векторов \vec{E} и \vec{H} (E – плоскость и H – плоскость):

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса?

2. Запишите функцию, определяющую нормированную амплитудную характеристику направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{H} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

3. Запишите функцию, определяющую нормированную амплитудную характеристику направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{E} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

4. Изобразите в полярной системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{H} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

5. Изобразите в полярной системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{E} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

6. Изобразите в прямоугольной (декартовой) системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{E} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

7. Изобразите в прямоугольной (декартовой) системе координат нормированную амплитудную диаграмму направленности в дальней (волновой) зоне в плоскости вектора \vec{N} :

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

8. Назовите геометрические фигуры, которые соответствуют пространственным (объемным) амплитудным диаграммам направленности в дальней (волновой) зоне:

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса.

9. Чему равен КНД в направлении максимального излучения:

- элементарного электрического излучателя;
- элементарной излучающей щели;
- элементарной электрической рамки;
- элемента Гюйгенса?

10. Электромагнитные волны какого вида поляризации излучаются элементарными излучателями в свободном пространстве в дальней (волновой) зоне?

11. Как зависят от расстояния r значения амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей в дальней (волновой) зоне элементарных излучателей?

12. Какой вектор (векторы) распределен (распределены) равномерно на поверхности:

- элементарного электрического излучателя;
- элементарного магнитного излучателя;
- элемента Гюйгенса?

13. Какими критериями определяются границы ближней и дальней (волновой) зоны элементарных излучателей?

14. Запишите и поясните формулы, позволяющие определить поверхностные плотности электрического и магнитного токов элементарных излучателей через тангенциальные составляющие электромагнитных полей на их поверхностях?

15. Как определить направление распространения электромагнитной волны в некоторой точке, если в этой точке известны векторы \vec{E} и \vec{H} .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д.* Техническая электродинамика. Учебное пособие для вузов / Под ред. *Ю.В. Пименова*. — М.: Радио и связь, 2000. — 536 с.
2. *Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П.* Электродинамика и распространение радиоволн. Учебник / Под ред. *В.А. Неганова и С.Б. Раевского*. Изд. 4-е, доп. и перераб. — М.: Радиотехника, 2009. — 744 с., ил.
3. *Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г.* Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. Учебник для вузов/ Под ред. *Г.А. Ерохина*. 2-е издание — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 491с.: ил.
4. *Очков В.Ф.* Mathcad 14 для студентов и инженеров: русская версия. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.: ил.

В.П. КУБАНОВ

**ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН**

Подписано в печать: 8.02.2011
Тираж: 100 экз. Усл. п.л. 2,34 Заказ № 868
Отпечатано в издательстве учебной и научной литературы
Поволжского государственного университета
телекоммуникаций и информатики
443090, г. Самара, Московское шоссе 77.
т. (846) 228-00-44