ЭУМК

АНТЕННЫ

Лекция 1.

Уравнения Максвелла, диполь Герца. Магнитный диполь, турникетный излучатель.

Радиотехника изучает процессы переноса информации радиосигналами, их распространение по «эфиру» в виде радиоволн, процесс излучения, приёма, обработки радиосигналов в приборах, созданных по аналоговой или цифровой технологии. Антенны и устройства СВЧ, тесно с ними связанные, - это область аналоговой техники. Практически всё остальное в радиотехнике – области цифровой технологии. Антенна – это существенная и нередко самая заметная часть радиосистемы. Нам предстоит понять, как работают антенны, научиться рассчитывать некоторые из них, на лабораторных занятиях – попрактиковаться в измерении простейших антенных параметров.

Для овладения современной антенной техникой и техникой СВЧ теоретических знаний недостаточно. В последние 10-15 лет, благодаря развитию компьютерной техники, начали широко применяться программы электродинамического моделирования, без использования которых немыслимо проектирование антенн и приборов СВЧ. Компьютерное моделирование заменило трудоёмкий процесс экспериментальной отработки. Это важно не только для антенн, но и для создания выходных каскадов передатчиков и входных (малошумящих) каскадов приёмников. Поэтому, на практических занятиях вы будете решать задачи с применением электродинамического моделирования. Вы научитесь с помощью компьютера вычислять характеристики более реалистичных антенн, чем характеристики теоретических моделей, которые будут представлены в лекциях. Но сами программы электродинамического моделирования созданы на основе теоретических моделей, поэтому, чтобы понять как они работают и уметь отличать правильный результат, полученный по программе электродинамического моделирования, от неверного, необходимо осваивать азы теории.

1.1 Уравнения Максвелла; эксперимент Герца

В 70-х годах 19 века английский физик-теоретик Максвелл предложил описывать физику электромагнитных явлений (экспериментально исследованных Фарадеем и другими физиками) с помощью системы из 20 дифференциальных уравнений с 20-ю неизвестными. Ведущие физики и математики того времени пытались понять суть этих уравнений, часто, не очень то им доверяя. Пытались из уравнений Максвелла выделить описание каких-нибудь знакомых им физических процессов, например, механических. Успех пришёл к немецкому физику Генриху Герцу в конце следующего десятилетия, который провёл теоретические и экспериментальные исследования, связанные с уравнениями Максвелла.

Он свёл систему Максвелла к системе из восьми дифференциальных уравнений с шестью неизвестными функциями. Герц не использовал векторную символику, хотя к тому времени трудами Хевисайда и Гиббса был создан и применён Хевисайдом к уравнениям Максвелла векторный анализ. В векторных обозначениях неизвестные Герца - это декартовые составляющие 2-х векторных функций 3-мерного пространства и времени $\boldsymbol{E}(x,y,z,t)$ и $\boldsymbol{H}(x,y,z,t)$. В нашем курсе изучаются эти уравнения в форме, справедливой для электромагнитных полей в линейных изотропных средах.

$$rot\boldsymbol{H} = \varepsilon\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} + \boldsymbol{j}^e; \quad rot\boldsymbol{E} = -\mu\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t};$$

$$div\boldsymbol{E} = \frac{\rho^e}{\varepsilon}; \quad div\boldsymbol{H} = 0; \qquad (1\text{-}1)$$

Размерности $\boldsymbol{H}\,[A/м]$, $\boldsymbol{E}\,[B/м]$, $\boldsymbol{j}^e\,[A/м^2]$. Главным частным случаем (1-1) для нас будет изучение работы антенны в свободном пространстве: $\varepsilon = \varepsilon_0, \mu = \mu_0$.

Герц не только упростил форму уравнений Максвелла, но и поставил эксперименты, в которых доказал **реальное существование** электромагнитных волн, распространяющихся в полном соответствии с уравнениями Максвелла. Лишь после этого физики и математики поверили теории Максвелла. Максвелл не дожил до этого события. При постановке эксперимента Герц создал первую радиосистему, состоящую из антенны, передатчика и приёмника. Тем не менее, он не предполагал возможности широкого практического применения своего открытия.

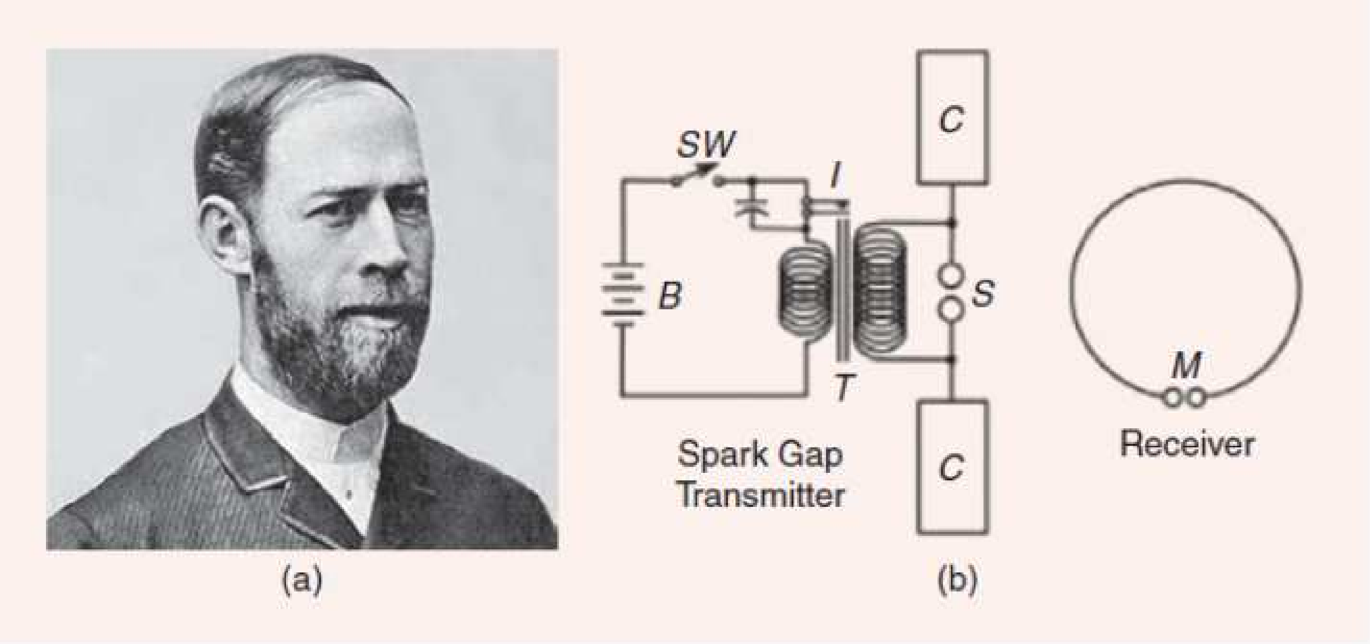


Рис.1.1 Схема первоначального эксперимента Герца
T-S -искровой аппарат Кайзера
M - искровой промежуток в приёмном контуре

В теории и технике антенн обычно пользуются уравнениями Максвелла в форме, отличающейся от (1-1). От векторов поля, являющихся функциями пространства и времени, переходят к их спектральным составляющим, которые являются функциями пространства и частоты $\boldsymbol{E}(x,y,z,t) \Rightarrow \boldsymbol{E}(x,y,z,\omega)e^{i\omega t}$. Это позволяет заменить дифференцирование по времени алгебраической операцией умножения на частоту. Уравнения Максвелла относительно преобразованных векторов поля на фиксированной частоте, обозначение которых мы, однако, здесь не меняем, записываются в следующем виде:

$$rot\boldsymbol{H} = i\omega\varepsilon\boldsymbol{E} + \boldsymbol{j}^e \quad [A/м^2]; \qquad rot\boldsymbol{E} = -i\omega\mu\boldsymbol{H} - \boldsymbol{j}^m \quad [B/м^2]; \qquad (1\text{-}2)$$

Уравнения с дивергенцией из (1-1) являются следствием совокупности уравнений (1-2) и уравнения непрерывности тока (уравнения сохранения электрического заряда): $div\,\boldsymbol{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0;$

1.2 Физическая и инженерная форма уравнений Максвелла

Хотя уравнения (1-1) и (1-2) описывают одну и ту же физическую реальность, но в уравнения (1-2) в качестве источника поля дополнительно входит **магнитный ток** $\boldsymbol{j}^m$, в то время, как из курса физики известно, что в природе нет ни магнитных токов, ни магнитных зарядов. За этой формой скрыта разная роль уравнений, используемых физиками и инженерами. Для физиков важно описать явления в их взаимосвязи, вплоть до последних кирпичиков мироздания. Инженеры же разбивают сложную электродинамическую задачу, в которой взаимодействуют между собой антенна, передатчик, приёмник, элементы фильтрации, суммирования и разделения сигналов, на несколько простых подзадач. Сторонние электрические и магнитные токи играют роль элементов связи взаимодействующих устройств, возбуждающих электромагнитное поле.

В качестве источников в уравнения (1-2) входят объёмные плотности электрических и магнитных токов. Кроме этого, источниками поля могут быть касательные составляющие поля на границах областей, потому что электромагнитное поле в какой либо области, свободной от источников, согласно теореме единственности, однозначно определяется касательными составляющими поля на границе области. А, согласно теореме эквивалентности, эти касательные составляющие можно представить как **эквивалентные поверхностные плотности** электрических и магнитных токов, которые определяются формулами:

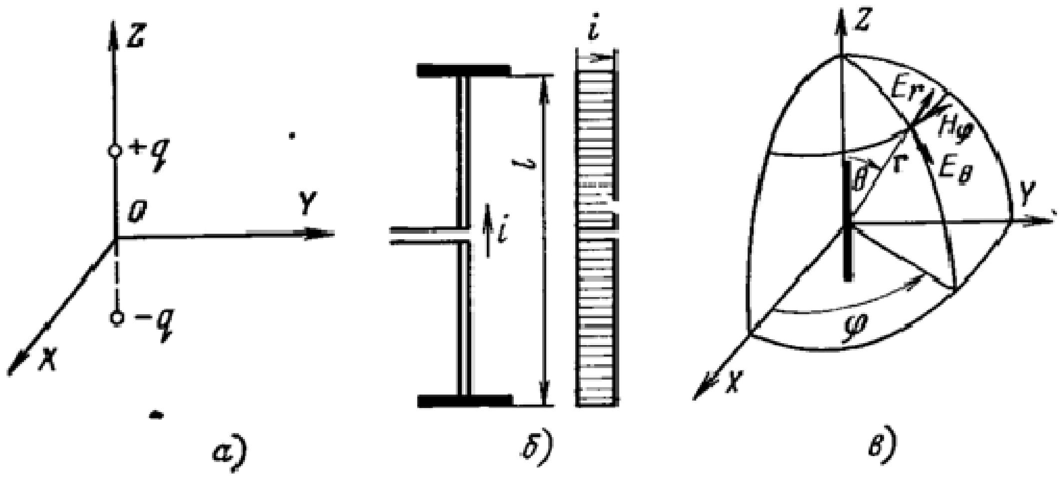
$$\boldsymbol{J}^e = \left[\boldsymbol{n},\boldsymbol{H}\right][A/м]; \quad \boldsymbol{J}^m = -\left[\boldsymbol{n},\boldsymbol{E}\right][B/м]; \qquad (1\text{-}3)$$

В формулах (1-3) $\boldsymbol{n}$ - единичная нормаль к поверхности на границе, направленная внутрь области, в которой вычисляется поле. Размерности поверхностных плотностей электрического и магнитного токов совпадают с размерностями векторов соответствующих полей (то есть, [А/м] для поверхностной плотности электрического поля и [В/м] для поверхностной плотности магнитного тока. Полный ток, проходящий через элементарный отрезок dl на поверхности, перпендикулярный вектору плотности тока, равен произведению $\boldsymbol{J}\,dl$, поэтому размерность полного электрического тока [А], а полного магнитного тока [В]. Выражения (1-3) показывают, что магнитные токи возникают тогда, когда взаимодействующие устройства связаны между собой переменным электрическим полем.

Элементарным источником поля, сосредоточенным в одной точке, например, в начале координат, в правой части уравнений Максвелла (1-2) является **электрический диполь**.

$$\boldsymbol{j}^e = \boldsymbol{e}_I^e\, I^e\, \delta\left(\boldsymbol{R}\right); \qquad (1\text{-}4)$$

Здесь, $\boldsymbol{e}_I^e$ - единичный вектор, направленный вдоль электрического тока, I^e - величина тока в диполе, $\delta\left(\boldsymbol{R}\right)$ – дельта функция, сосредоточенная в начале координат $\boldsymbol{R}=0$.
Элементарный электрический диполь был экспериментально смоделирован Герцем (рис. 1.1), поэтому называется диполем Герца.



Элементарный электрический диполь·
а — модель диполя, состоящего из двух зарядов *q*; *б* — диполь Герца; *в* — пространственные составляющие электромагнитного поля в сферической системе координат

В результате решения уравнений Максвелла, подробности получения которого мы опускаем, получаются выражения для поля диполя Герца в **дальней зоне**:

$$\boldsymbol{H} = C^e \left[\boldsymbol{e}_I^e, \boldsymbol{e}_R \right] \frac{e^{-ikR}}{R}; \quad \boldsymbol{E} = W_0 \left[\boldsymbol{H}, \boldsymbol{e}_R \right]; \text{ где } C^e = i \frac{I^e k l^e}{4\pi} \qquad (1\text{-}5)$$

В этих формулах $\boldsymbol{e}_R$ - это единичный вектор, направленный от источника в точку наблюдения, k – волновое число, I^e - ток диполя, $I^e k l^e$ - электрический момент диполя, $R = |\boldsymbol{R}|$ – расстояние от источника до точки наблюдения, $W_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ - волновое сопротивление среды. Второе уравнение из (1-5) справедливо не только для диполя Герца, но также для электромагнитных полей любых источников в дальней зоне. Это свойство плоских и локально плоских волн. Под $\boldsymbol{e}_R$ здесь подразумевается единичный вектор, направленный в точку наблюдения от начала координат по радиусу сферической системы. Под дальней зоной в формулах (1-5) понимается область пространства, где выполняется неравенство:: $kR \gg 1$. В формулах (1-5) продольные составляющие вдоль вектора $\boldsymbol{R}$ отсутствуют совсем. Точная формула поля диполя с продольными составляющими, справедливая при любом *R*, не в дальней зоне – более сложная.

Поясним смысл приведённых формул (1-5). Поле меняется по мере удаления от источника по закону $\frac{e^{-ikR}}{R}$, магнитное поле замыкается вокруг тока, поэтому ориентировано ортогонально направлению тока и направлению на источник, а значит, пропорционально векторному произведению этих направлений, электрическое поле в дальней зоне поперечно, то есть, ортогонально направлению от источника, кроме того, оно ортогонально магнитному полю. В дальней зоне (для локально плоской волны) отношение величин полей ***E* и *H*** равно волновому сопротивлению среды. Выражение константы C^e можно получить в результате подстановки полей $\boldsymbol{E}, \boldsymbol{H}$ (1-5) в уравнения (1-2) с учётом (1-4) и приближения дальней зоны..

Вычисления в дальней зоне используют простой математический аппарат **векторной алгебры** в трёхмерном пространстве. Электромагнитные поля имеют векторный характер. Геометрия любой антенны описывается проще всего в декартовой системе координат, а форма радиоволны, излучённой любой антенной в дальней зоне всегда сферическая. Из рис. 1.2 можно понять, как связаны между собой декартова и сферическая системы координат в пространстве. Мы часто будем пользоваться матрицей перехода от декартовых координат к сферическим. (Необходимо вспомнить определение скалярного и векторного произведений, двойного векторного произведения.)

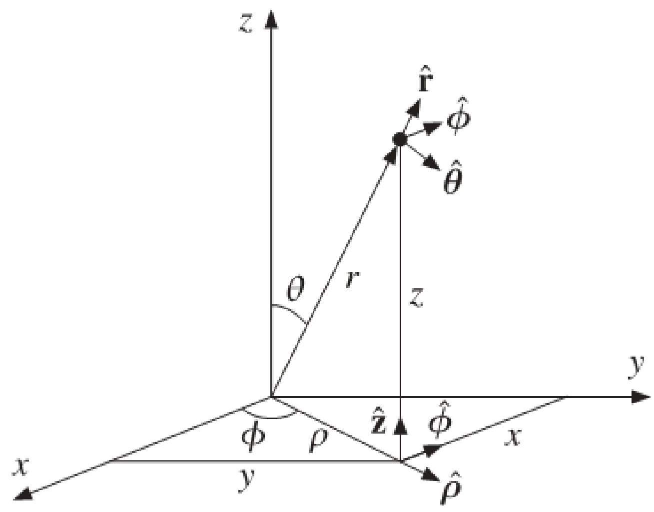


Рис. 1.2. Декартова, цилиндрическая и сферическая системы координат.

Матрица связи (1-6) единичных векторов декартовой и сферической систем координат состоит из 9-ти скалярных произведений составляющих единичных векторов в двух системах координат:

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{ccc} \boldsymbol{e}_R & \boldsymbol{e}_\vartheta & \boldsymbol{e}_\varphi \end{array} \\ \begin{array}{c} \boldsymbol{e}_x \\ \boldsymbol{e}_y \\ \boldsymbol{e}_z \end{array} & \begin{pmatrix} \sin\vartheta\cos\varphi & \cos\vartheta\cos\varphi & -\sin\varphi \\ \sin\vartheta\sin\varphi & \cos\vartheta\sin\varphi & \cos\varphi \\ \cos\vartheta & -\sin\vartheta & 0 \end{pmatrix} \end{array} \qquad (1\text{-}6)$$

Рассмотрим примеры вычисления полей в дальней зоне, и в качестве первого примера получим из (1-5) выражение поля излучения электрического диполя. Будем считать, что ось диполя совпадает с осью сферической системы координат (ось Z декартовой системы). Единичный вектор вдоль направления диполя, заданный в декартовой системе координат, раскладываем по ортам сферической системы. Затем применяем формулы (1-5) и проводём необходимые векторные вычисления.

$$\begin{gathered} \boldsymbol{e}_I^e = \boldsymbol{e}_z; \quad \boldsymbol{e}_z = \cos\vartheta\boldsymbol{e}_R - \sin\vartheta\boldsymbol{e}_\vartheta; \\ \boldsymbol{H} = C^e\left[\boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_R\right]\frac{e^{-ikR}}{R}; \quad \boldsymbol{E} = W_0 C^e\left[\left[\boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_R\right], \boldsymbol{e}_R\right]\frac{e^{-ikR}}{R}; \\ \left[\boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_R\right] = \cos\vartheta\left[\boldsymbol{e}_R, \boldsymbol{e}_R\right]_r - \sin\vartheta\left[\boldsymbol{e}_\vartheta, \boldsymbol{e}_R\right] = \sin\vartheta\boldsymbol{e}_\varphi; \\ \left[\left[\boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_R\right], \boldsymbol{e}_R\right] = \sin\vartheta\left[\boldsymbol{e}_\varphi, \boldsymbol{e}_R\right] = \sin\vartheta\boldsymbol{e}_\vartheta; \end{gathered} \qquad (1\text{-}7)$$

В результате получаем хорошо известные формулы для поля излучения вертикального электрического диполя Герца, которые фигурировали в курсе изучения электродинамики.

$$\boldsymbol{H} = \sin\vartheta\boldsymbol{e}_\varphi C^e\frac{e^{-ikR}}{R}; \quad \boldsymbol{E} = \sin\vartheta\boldsymbol{e}_\vartheta W_0 C^e\frac{e^{-ikR}}{R}; \; C^e = i\frac{I^e k l^e}{4\pi} \qquad (1\text{-}5,a)$$

Для электрического диполя поперечные векторы $\boldsymbol{E}$ лежат в плоскостях, содержащих весь диполь, а векторы $\boldsymbol{H}$ в плоскостях, ортогональных диполю. Можно проверить, что в дальней зоне между электрическим и магнитным полем выполнено соотношение, являющееся следствием универсальной связи, определяемой 2-й формулой (1-5):

$$\frac{E_\vartheta}{H_\varphi} = W_0 \qquad (1\text{-}8)$$

Применённый подход позволяет по одной и той же методике получать выражения для поля излучения как угодно ориентированных в пространстве диполей.

1.3. Магнитный диполь

Продолжим рассмотрение примеров вывода выражений полей излучения в дальней зоне. Для получения выражений поля излучения элементарного **магнитного диполя** воспользуемся свойством симметрии (двойственности) уравнений Максвелла. Выполним замены (1-9) в выражениях (1-5) и (1-5а):

$$\begin{aligned} &\boldsymbol{E} \Rightarrow \boldsymbol{H} \quad \boldsymbol{H} \Rightarrow -\boldsymbol{E} \quad \varepsilon \Rightarrow \mu \\ &\boldsymbol{j}^e \Rightarrow \boldsymbol{j}^m \quad \boldsymbol{j}^m \Rightarrow -\boldsymbol{j}^e \quad \mu \Rightarrow \varepsilon \end{aligned} \tag{1-9}$$

(После проведения в уравнения Максвелла таких заменах уравнения не меняются.) Получим поле излучения магнитного диполя, ориентированного вдоль оси Z

$$\boldsymbol{E} = -\sin\vartheta e_\varphi C^m \frac{e^{-ikR}}{R}; \quad \boldsymbol{H} = \sin\vartheta e_\vartheta W_0^{-1} C^m \frac{e^{-ikR}}{R}; \tag{1-10}$$

$$\boldsymbol{E} = -C^m \left[\boldsymbol{e}_z, \boldsymbol{e}_R\right] \frac{e^{-ikR}}{R}$$

Мы заменили также выражение коэффициента $C^e = i\dfrac{I^e k l^e}{4\pi}$ на $C^m = i\dfrac{I^m k l^m}{4\pi}$, в котором поменяли индекс e на m и воспользовались соотношениями двойственности (1-9). В этих формулах универсальное соотношение между электрическим и магнитным полем в дальней зоне имеет следующий вид:

$$\frac{E_\varphi}{H_\vartheta} = -W_0; \tag{1-11}$$

Для магнитного диполя плоскостями **H** являются все плоскости, проходящие через ось магнитного диполя, а плоскостью **E** – плоскость, ортогональная диполю.

Используя написанные формулы, можно получить характеристики излучения элементарных диполей, ориентированных вдоль каждой из трёх декартовых осей:

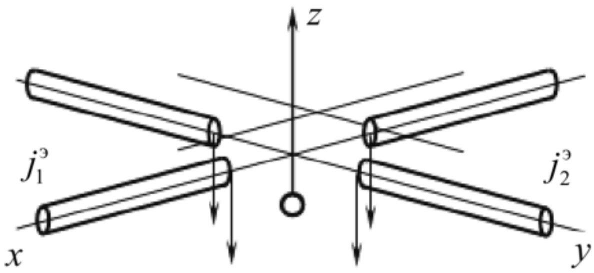
	электрический диполь	магнитный диполь
$\boldsymbol{e}_x$:	$\boldsymbol{E} \doteq \dot{I}_x^e W_0 \left(-\cos\vartheta\cos\varphi\, \boldsymbol{e}_\vartheta + \sin\varphi\, \boldsymbol{e}_\varphi\right)$	$\boldsymbol{E} \doteq \dot{I}_x^m \left(\sin\varphi\, \boldsymbol{e}_\vartheta + \cos\vartheta\cos\varphi\, \boldsymbol{e}_\varphi\right)$
$\boldsymbol{e}_y$:	$\boldsymbol{E} \doteq \dot{I}_y^e W_0 \left(-\cos\vartheta\sin\varphi\, \boldsymbol{e}_\vartheta - \cos\varphi\, \boldsymbol{e}_\varphi\right)$	$\boldsymbol{E} \doteq \dot{I}_y^m \left(-\cos\varphi\, \boldsymbol{e}_\vartheta + \cos\vartheta\sin\varphi\, \boldsymbol{e}_\varphi\right)$
$\boldsymbol{e}_z$:	$\boldsymbol{E} \doteq \dot{I}_z^e W_0 \sin\vartheta\, \boldsymbol{e}_\vartheta$	$\boldsymbol{E} \doteq -\dot{I}_z^m \sin\vartheta\, \boldsymbol{e}_\varphi$

1.6. Сложение полей двух ортогональных электрических диполей - турникетный излучатель

В качестве примера получим выражения для поля излучения **турникетной антенны**, состоящей из двух элементарных электрических диполей, ориентированных вдоль осей X и Y, запитанных во временной квадратуре. Положим в формулах

$$\boldsymbol{H} = C^e \left[\boldsymbol{e}_I^e, \boldsymbol{e}_R\right] \frac{e^{-ikR}}{R}; \quad \boldsymbol{E} = W_0 \left[\boldsymbol{H}, \boldsymbol{e}_R\right]; \text{ где } C^e = i\frac{I^e k l^e}{4\pi}$$

$$\boldsymbol{e}_{I1} = \boldsymbol{e}_x; \quad \boldsymbol{e}_{I2} = \boldsymbol{e}_y; \quad I_2 = iI_1; \tag{1-12}$$



Разложим единичные векторы $\boldsymbol{e}_x, \boldsymbol{e}_y$ по ортам сферической системы координат, воспользовавшись таблицей 1.6 и вычислим с помощью этих разложений векторные произведения, входящие в формулы (1-12):

$$\boldsymbol{e}_x = \sin\vartheta\cos\varphi\boldsymbol{e}_R + \cos\vartheta\cos\varphi\boldsymbol{e}_\vartheta - \sin\varphi\boldsymbol{e}_\varphi;$$

$$\boldsymbol{e}_y = \sin\vartheta\sin\varphi\boldsymbol{e}_R + \cos\vartheta\sin\varphi\boldsymbol{e}_\vartheta + \cos\varphi\boldsymbol{e}_\varphi; \tag{1-13}$$

$$\left.\begin{aligned}\left[\boldsymbol{e}_{I1}, \boldsymbol{e}_R\right] &= -\cos\vartheta\cos\varphi\boldsymbol{e}_\varphi - \sin\varphi\boldsymbol{e}_\vartheta \\ \left[\boldsymbol{e}_{I2}, \boldsymbol{e}_R\right] &= -\cos\vartheta\sin\varphi\boldsymbol{e}_\varphi + \cos\varphi\boldsymbol{e}_\vartheta\end{aligned}\right\}\begin{matrix}1\\ i\end{matrix}$$

После сложения полей от X- й и Y-й составляющих тока, с коэффициентом "1" для X- й составляющей и "i" для Y-й , в результате получим:

$$\boldsymbol{H} = \left(-\cos\vartheta\boldsymbol{e}_\varphi + i\boldsymbol{e}_\vartheta\right)e^{i\varphi}C\frac{e^{-ikR}}{R};$$

$$\boldsymbol{E} = \left(-\cos\vartheta\boldsymbol{e}_\vartheta - i\boldsymbol{e}_\varphi\right)e^{i\varphi}W_0C\frac{e^{-ikR}}{R}; \quad C = i\frac{Ikl}{4\pi} \tag{1-14}$$

Нетрудно проверить, что между электрическим полем и магнитным выполняются те же соотношения, что и в примерах электрического и магнитного диполей:

$$\frac{E_\vartheta}{H_\varphi} = -\frac{E_\varphi}{H_\vartheta} = W_0; \tag{1-15}$$

Вычислим КНД турникетной антенны. Диаграмма направленности определяется с точностью до постоянного множителя зависимостью величины модуля поля $\boldsymbol{E}$ (1-19) от угловых координат:

$$\left|F(\vartheta,\varphi)\right| = \left|-\cos\vartheta\boldsymbol{e}_\vartheta - i\boldsymbol{e}_\varphi\right| = \sqrt{1+\cos^2\vartheta} \tag{1-16}$$

В следующей лекции мы подробно поговорим о **коэффициенте направленного действия** (КНД), в этой лекции мы вычислим его для турникетного излучателя. КНД определяется следующим образом:

$$КНД = \frac{S_{макс}}{S_{ср}}; \quad S = 0.5\left|\mathrm{Re}\left[\boldsymbol{E},\boldsymbol{H}^*\right]\right|;$$

Так как в дальней зоне векторы $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ ортогональны между собой и между их величинами , выполнено соотношение $\left|\boldsymbol{E}\right| = W_0\left|\boldsymbol{H}\right|$, подстановка (1-16) в определение , с учётом того, что выражение (1-16) принимает максимальное значение $\sqrt{2}$ при $\vartheta = 0, \pi$, даёт:

$$КНД = \frac{4\pi\max\left(\left|F(\vartheta,\varphi)\right|^2\right)}{\int_0^{2\pi}d\varphi\int_0^{\pi}\left|F(\vartheta,\varphi)\right|^2\sin\vartheta d\vartheta} = \frac{4\pi*2}{2\pi\int_0^{\pi}\left(1+\cos^2\vartheta\right)\sin\vartheta d\vartheta} = 1.5 \tag{1-17}$$

Если в формулу для КНД подставить $F(\vartheta,\varphi) = \left|\sin\vartheta\right|$, то получим тот же ответ для КНД отдельного диполя. Поляризационная характеристика (подробный разговор о которой будет в следующей лекции) определяется соотношением между коэффициентами $E_\vartheta(\vartheta,\varphi)$, $E_\varphi(\vartheta,\varphi)$ при ортах сферической системы координат. В выражениях (1-16)соотношение коэффициентов при ортах зависит от угла **θ**. При **θ =π/2** коэффициент при $\boldsymbol{e}_\vartheta$ в формуле для электрического поля обращается в нуль. Следовательно, поляризация при **θ =π/2** линейная, совпадающая с направлением вектора $\boldsymbol{e}_\varphi$. При **θ =0** и **θ =π** коэффициенты при ортах равны по величине и сдвинуты по фазе на **π/2,.** В этих направлениях поляризация круговая. При выбранной фазировке диполей турникетной антенны она линейно поляризована только в плоскости **θ =π/2**, проходящей через диполи. Это её плоскость **E.** Плоскости **H** у этой антенны нет.

<u>Контрольные вопросы:</u>

1. Почему физики и инженеры используют разную форму уравнений Максвелла для описания электромагнитного поля?
2. Для каких частных случаев применима форма записи уравнений Максвелла (1-1 и 1-2).
3. Запишите уравнения Максвелла, которым удовлетворяет электромагнитное поле элементарного электрического диполя. (А магнитного диполя?)
4. Как меняется амплитуда электромагнитного поля любой антенны в дальней зоне в зависимости от расстояния от антенны?
5. Как математически выражается свойство поперечности электромагнитного поля в дальней зоне?
6. Как связаны между собой электрическое и магнитное поля в плоской (и локально плоской) волне?
7. Какой математический аппарат используется для вычисления пространственной зависимости полей излучения антенн в дальней зоне?
8. В чём состоит принцип двойственности в уравнениях Максвелла? Для чего мы его применяем?
9. Какую пространственную форму имеет поле излучения любой антенны в дальней зоне?
10. Что такое «диаграмма направленности» антенны?
11. Покажите плоскости $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ для электрического и магнитного диполей.

Литература:

1. Сазонов Д.М. "Антенны и устройства СВЧ"б М., Высшая школа, 1988
2. "Антенны", учебное пособие, издательство ", Санкт-Петербург, изд-во "Лань", 2016. Авторы: Зырянов Ю.Т., Федюнин П.А, [и др.]
3. Банков С.Е., Курушин А.А., "Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР."Москва, 2008г.
4. "Основы техники зеркальных антенн",учебное пособие, МЭИ, 2023. Авторы: КоганБ.Л., Белькович И.В. [и др.]