УДК 621.372.512

О дифракции Френеля, ближней зоне и мнимой области

(Часть 1. Продолжение читайте в № 2/2022)

И. Е. БУЙВАЛОВ,
начальник отдела
ОАО «АЛЕВКУРП»

В статье рассматривается диаграмма направленности линейной антенны в области мнимых углов, которая, как показано, описывает дифракцию Френеля. Для анализа поля антенны используется метод зон Френеля, применяемый в оптике.

Введение. Исследование поля антенны с помощью электродинамических методов приводит к достаточно сложным аналитическим выражениям, не обладающим простой физической наглядностью. В то же время использование известных и хорошо изученных представлений из других областей науки, подчиняющихся аналогичным физическим законам, позволяет быстрее, проще и нагляднее получить желаемый результат. Например, в антенных устройствах широко используются методы исследования, применяемые в оптике, теории электрорадиоцепей, теории длинных линий, то есть областях, имеющих дело с волновыми процессами.

Основная часть. В соответствии с теоремой перемножения диаграмм направленности результирующая комплексная диаграмма направленности антенны может быть представлена формулой [1]:

$$f(\theta,\varphi)=f_1(\theta,\varphi)f_c(\theta,\varphi),$$

где $f_1(\theta,\varphi)$ – комплексная диаграмма направленности элемента антенны (элементарного излучателя), $f_c(\theta,\varphi)$ – комплексная функция, называемая множителем системы.

Элементарным называется излучатель, размеры которого весьма малы по сравнению с длиной волны $\lambda >> \Delta L$, $\lambda^2 >> \Delta S$, где λ – длина волны, ΔL – длина элементарного излучателя линейной антенны длиной равной L, ΔS – площадь элементарного излучателя апертурной антенны с апертурой, равной S.

К элементарным излучателям относятся: элементарный электрический излучатель (диполь Герца), элементарный магнитный излучатель (магнитный диполь Герца) и излучатель Гюйгенса [2].

Одной из основных характеристик антенны, определяющей ее направленные свойства, является амплитудная диаграмма направленности.

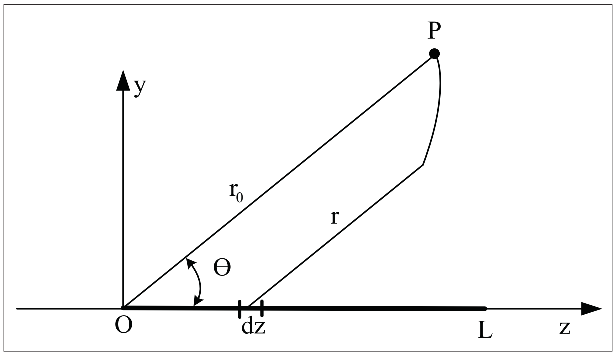

Рисунок 1.1 – Сложение полей элементарных излучателей в дальней зоне

Амплитудной диаграммой направленности антенны $|f(\theta,\varphi)|$ (далее – диаграмма направленности) называется зависимость амплитуды напряженности электрического поля в равноудаленных точках дальней зоны (r = const) от направления (сферических координат θ,φ).

Ниже, принимая во внимание слабую направленность элементарного излучателя $|f_1(\theta,\varphi)| \approx \text{const}$, будем рассматривать элементарный изотропный излучатель.

В общем виде множитель системы непрерывной линейной антенны записывается как:

$$|f_c(\theta)|=\left|\int_0^L A(z)e^{i\Phi(z)}e^{ikz\cos\theta}dz\right|, \qquad (1.1)$$

где L – длина антенны, A(z) и Φ(z) – соответственно амплитудное и фазовое распределение на антенне.

Множитель системы описывает эффект наложения (суперпозиции) сферических волн, возбуждаемых изотропными излучателями (элементами антенны dz) в дальней зоне, которую также называют областью дифракции Фраунгофера (рисунок 1.1). Результатом дифракции Фраунгофера является диаграмма направленности антенны, описываемая выражением (1.1) и измеряемая в дальней зоне при $r = r_0 = \mathrm{const}$. Дальняя зона характеризуется тем, что парциальные поля $d\vec{E}$ элементов антенны можно считать параллельными и оперировать ими как скалярными величинами.

Примечание. Интерференцией называется перераспределение энергии волн при их наложении, сопровождающееся чередованием максимумов и минимумов интенсивности в пространстве. Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики. Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. По историческим причинам перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным числом когерентных дискретных источников, принято называть интерференцией волн. Перераспределение интенсивности, возникающее вследствие суперпозиции волн, возбуждаемых когерентными источниками, расположенными непрерывно, принято называть дифракцией волн [3].

В отличие от дифракции Фраунгофера дифракция Френеля наблюдается в сходящихся лучах. На рисунке 1.2 изображена линейная антенна длиной L, на расстоянии r от ее края, на перпендикуляре к антенне в точке A находится точка наблюдения P.

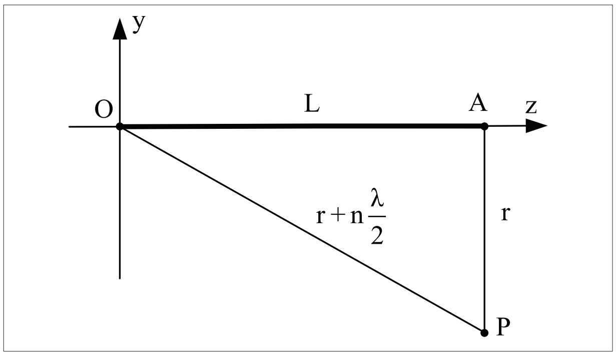

Рисунок 1.2 – Построение зон Френеля

Разобьем синфазно возбужденную линейную антенну длиной L из точки P на зоны Френеля b_n. В соответствии с методом зон Френеля фазовый набег в пределах каждой зоны в точке P изменяется на π, что соответствует разности хода волн от границ зоны $\lambda/2$. Набег фаз от внешних границ зон, таким образом, будет равняться $n \cdot \pi$, $n = 1, 2, 3, \ldots$, где n – номер зоны. Представляя каждую зону вектором, фаза которого меняется от зоны к зоне на 180°, можно амплитуду результирующего колебания в точке P представить суммой амплитуд колебаний отдельных зон $A_\Sigma = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \ldots$, заменив таким образом векторную сумму скалярной.

В соответствии с определением зон Френеля, из прямоугольного треугольника OAP имеем:

$$l_n^2 + r^2 = \left(n\frac{\lambda}{2} + r\right)^2, \qquad (1.2)$$

где l_n – радиус внешней границы n-ой зоны Френеля, $n = 1, 2, 3\ldots$ – номер зоны Френеля.

Из (1.2) получим уравнение $l_n^2(r) = n\lambda r + \left(n\frac{\lambda}{2}\right)^2$, которое является уравнением параболы. Вершина параболы с номером n находится на оси абсцисс в точке $\left(-\frac{n\lambda}{4};\ 0\right)$. Радиус внешней границы n-й зоны Френеля является функцией расстояния до точки P и равен

$$l_n = \sqrt{n\lambda r + \left(n\frac{\lambda}{2}\right)^2}. \qquad (1.3)$$

При r = 0 парабола пересекает ось ординат в точках $\pm\frac{n\lambda}{2}$. При фиксированных $l_n = L$ и λ, $r = \mathrm{const}$ количество зон Френеля остается неизменным при любом расположении точки A на антенне.

Примечание. Под количеством зон Френеля, исходя из определения, следует считать число изменений фазы на π в точке наблюдения, учитывая количество зон, расположенных симметрично относительно оси абсцисс. Симметрично расположенные зоны удваивают амплитуду поля в точке P.

Для удобства анализа, расстояние r в (1.3) будем изменять через интервалы, кратные $\frac{\lambda}{4}$. После подстановки в (1.3) $r = \frac{m\lambda}{4}$, $m = 0, 1, 2,\ldots$ получим:

$$l_{nm} = \frac{\lambda}{2}\sqrt{m \cdot n + n^2},$$

откуда ширина зон Френеля:

$$b_{n,m} = l_{n,m} - l_{n-1,m} = \frac{\lambda}{2}\left(\sqrt{m \cdot n + n^2} - \sqrt{m(n-1) + (n-1)^2}\right). \qquad (1.4)$$

Ширина первой зоны n = 1 для m = 1, 2, 3,... в соответствии с выражением (1.4) $b_{1,m} = l_{1,m} = n\frac{\lambda}{2}\sqrt{1 + \frac{m}{n}}$ будет, соответственно, равна $b_{11} = \frac{\lambda}{2}\sqrt{2}$, $b_{12} = \frac{\lambda}{2}\sqrt{3}$, $b_{13} = \lambda, \ldots$.

Остальные зоны с увеличением n уменьшаются, стремясь к $\lambda/2$. Величина, излучаемой мощности, приходящейся на одну зону, при равномерном амплитудном возбуждении антенны по мере увеличения номера зоны уменьшается, стремясь к некоторому значению, пропорциональному $\lambda/2$.

При не очень больших n, когда выполняется условие $\frac{n\lambda}{4} << r$, можно пренебречь вторым членом в (1.3) и для заданной длины антенны $L = l_n$ записать равенство $n = \frac{L^2}{\lambda r}$. Откуда следует, что с увеличением расстояния r до точки наблюдения P количество зон n будет уменьшаться, поочередно становясь то четным, то нечетным, приводя к образованию в точке P минимумов или максимумов соответственно. В итоге, когда на антенне будет укладываться лишь одна зона Френеля, амплитуда поля в точке P будет максимальной.

Расстояние r, на котором будет наблюдаться дифракция радиоволн от n-й зоны, можно записать из формулы (1.3):

$$r = \frac{l_n^2}{n\lambda} - \frac{n\lambda}{4}. \qquad (1.5)$$

Учитывая, что $r \geq 0$, получим условие для радиуса внешней границы n-й зоны Френеля:

$$l_n \geq \frac{n\lambda}{2}.$$

При r = 0 радиус зон Френеля и их ширина, соответственно, будут равны $l_n = \frac{n\lambda}{2}$, $b_n = \lambda/2$. Для антенны длиной $L = l_n$ количество зон для r = 0 равно $n = L/(\lambda/2)$.

Дальнюю границу области дифракции Френеля, то есть расстояние, при котором антенну длиной L будет «накрывать» лишь одна зона, можно найти из (1.5) для n = 1:

$$r_{max} = \frac{l_1^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} = \frac{L^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4}.$$

Для $L = \lambda$, $r_{max} = 0,75\lambda$, для $L = 50\lambda$ и $\lambda = 3$ см, $r_{max} = 75$ м.

При увеличении r дифракция Френеля переходит в дифракцию Фраунгофера. Для определения расстояния до ближней границы дальней зоны (области Фраунгофера) обычно задаются максимальной фазовой ошибкой на краю антенны $\Delta\Phi_{макс} \leq \pi/8$, что соответствует разности расстояний от края и центра антенны до точки наблюдения P равном $\Delta r = \lambda/16$.

Примечание. Необходимо заметить, что здесь речь идет о квадратичной фазовой ошибке, которая является четной функцией второго порядка. Точка наблюдения P при этом должна располагаться напротив середины антенны. Для дифракции Френеля, как говорилось выше, количество зон от этого не изменится.

Расстояние до ближней границы дальней зоны найдем из треугольника OAP (рисунок 1.2), когда точка A находится в центре антенны:

$$r_{min} \geq \frac{2L^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{32} \cong \frac{2L^2}{\lambda}.$$

Для $L = \lambda$, $r_{min} = 2\lambda$, для $L = 50\lambda$ и $\lambda = 3$ см, $r_{min} = 150$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антенные системы радиоэлектронных средств: учебник / Г. В. Хохлов [и др.]; под общ. ред. Г. В. Хохлова. – М.: Воениздат, 1978. – 368 с.
2. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие для вузов/ Никольский В.В., Никольская Т. И. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 544 с.
3. Курс общей физики, т.2: учеб. пособие / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1982 – 496 с.

The article discusses the radiation pattern of a linear antenna in the region of imaginary angles, which, as shown, describes the Fresnel diffraction. To analyze the antenna field, the Fresnel zone method used in optics is used.

Получено: 19.01.2022.