Ликбез по антеннам: диаграмма направленности

Аннотация

Перед тем как перейти к рассмотрению конструкции и работы разного типа антенн, рассмотрим одну из важнейших характеристик антенны – диаграмму направленности и те параметры, которые из нее напрямую вытекают.
Рекомендую, также, ознакомиться с предыдущей статьёй - Ликбез: основы теории по антеннам.

Введение

Антенна, вне зависимости от конструкции, обладает свойством обратимости (может работать как на прием, так и на излучение). Часто в радиорелейных трактах одна и та же антенна может быть подключена одновременно к приемнику и передатчику. Это позволяет излучать и принимать сигнал в одном направлении на разных частотах.

Почти все параметры приемной антенны соответствуют параметрам передающей антенны, но иногда имеют несколько другой физический смысл.

Несмотря на то, что приемная и передающая антенны обладают принципом двойственности, в конструктивном отношении они могут существенно отличаться. Связано это с тем, что передающая антенна должна пропускать через себя значительные мощности для передачи электромагнитного сигнала на большие (максимально возможные) расстояния. Если же антенна работает на прием, то она взаимодействует с полями очень малой напряженности. Вид токопередающей конструкции антенны часто определяет ее конечные габариты.

Пожалуй, основная характеристика любой антенны это диаграмма направленности. Из нее вытекает множество вспомогательных параметров и такие важные энергетические характеристики как коэффициент усиления и коэффициент направленного действия.

Диаграмма направленности

Диаграмма направленности (ДН) – это зависимость напряженности поля, создаваемого антенной на достаточно большом расстоянии, от углов наблюдения в пространстве. В объеме диаграмма направленной антенны может выглядеть так, как показано на рисунке 1.

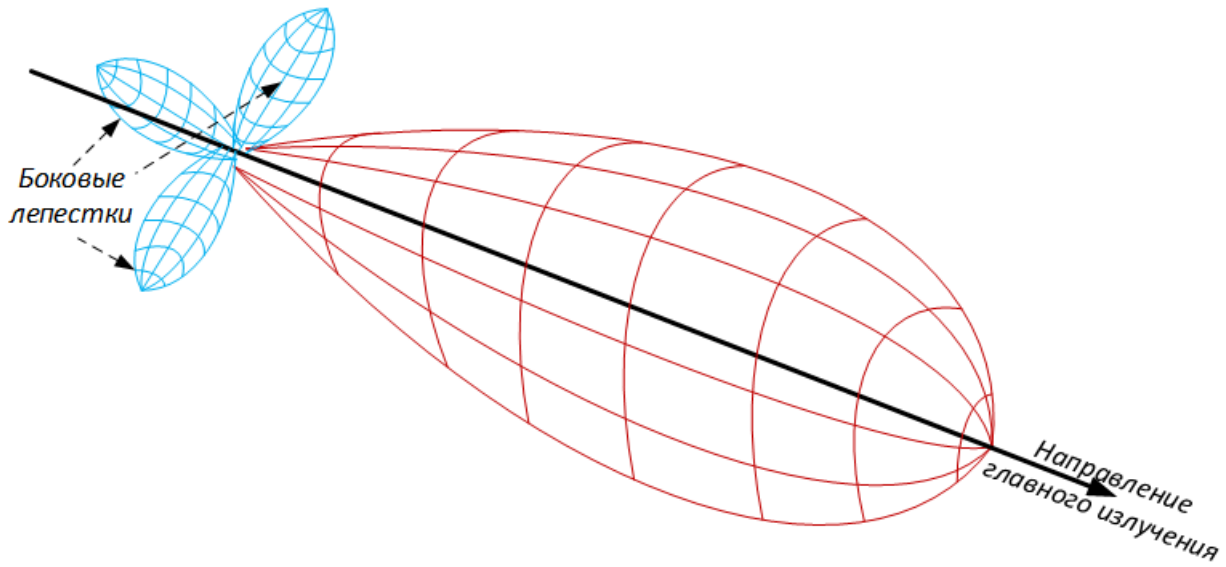

Рисунок 1

То, что изображено на рисунке выше также еще называют пространственной диаграммной направленностью, которая является поверхностью объема и может иметь несколько максимумов. Главный максимум, выделенный на рисунке красным цветом, называется главным лепестком диаграммы и соответствует направлению главного излучения (или приема). Соответственно первые минимальные или (реже) нулевые значения напряженности поля вокруг главного лепестка определяют его границу. Все остальные максимальные значения поля называются боковыми лепестками.

На практике встречаются различные антенны, которые могут иметь несколько направлений максимального излучения, или не иметь боковых лепестков вовсе.

Для удобства изображения (и технического применения) ДН их принято рассматривать в двух перпендикулярных плоскостях. Как правило, это плоскости электрического вектора E и магнитного вектора H (которые друг другу в большинстве сред перпендикулярны), рисунок 2.

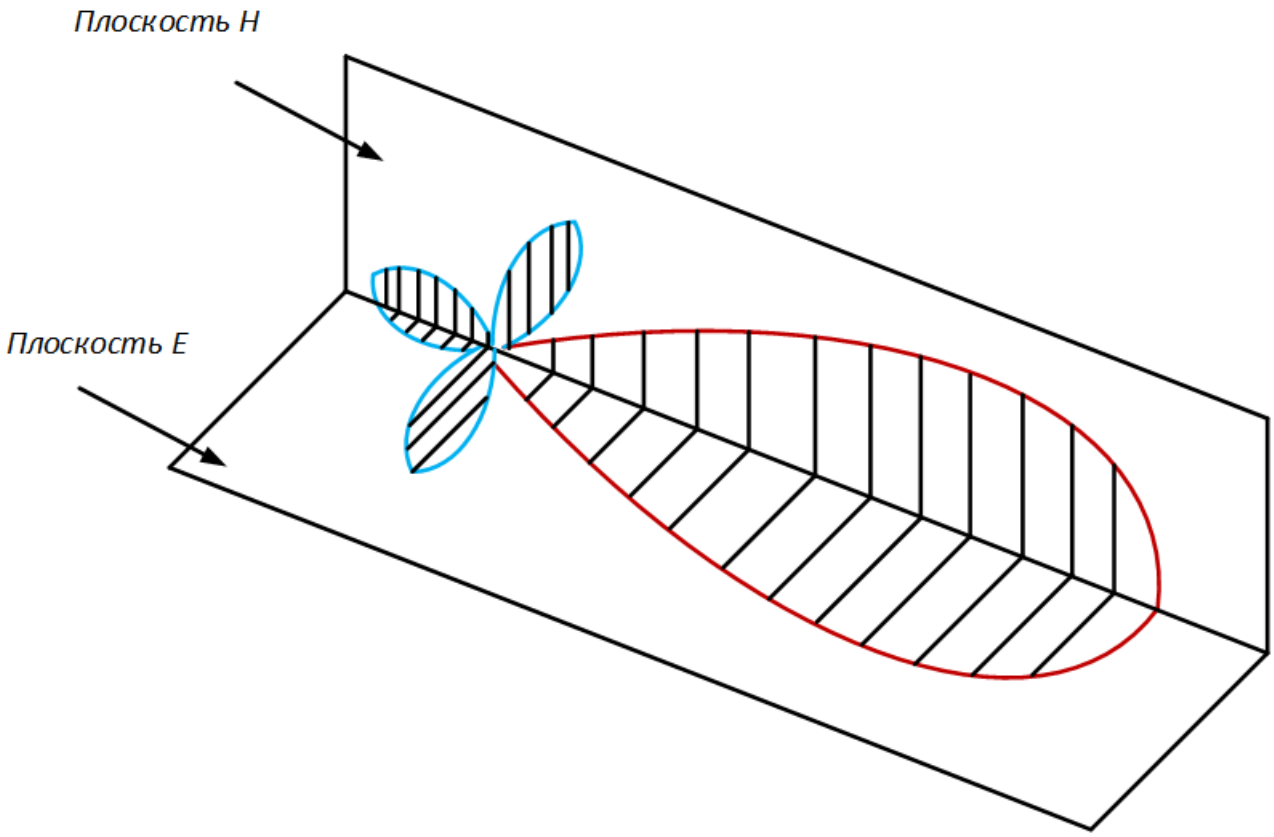

Рисунок 2

В некоторых случаях ДН рассматривают в вертикальной и горизонтальной плоскостях по отношению к плоскости Земли. Плоские диаграммы изображают полярной или декартовой (прямоугольной) системами координат. В полярных координатах диаграмма более наглядна, и при наложении ее на карту можно получить представление о зоне действия антенны радиостанции, рисунок 3.

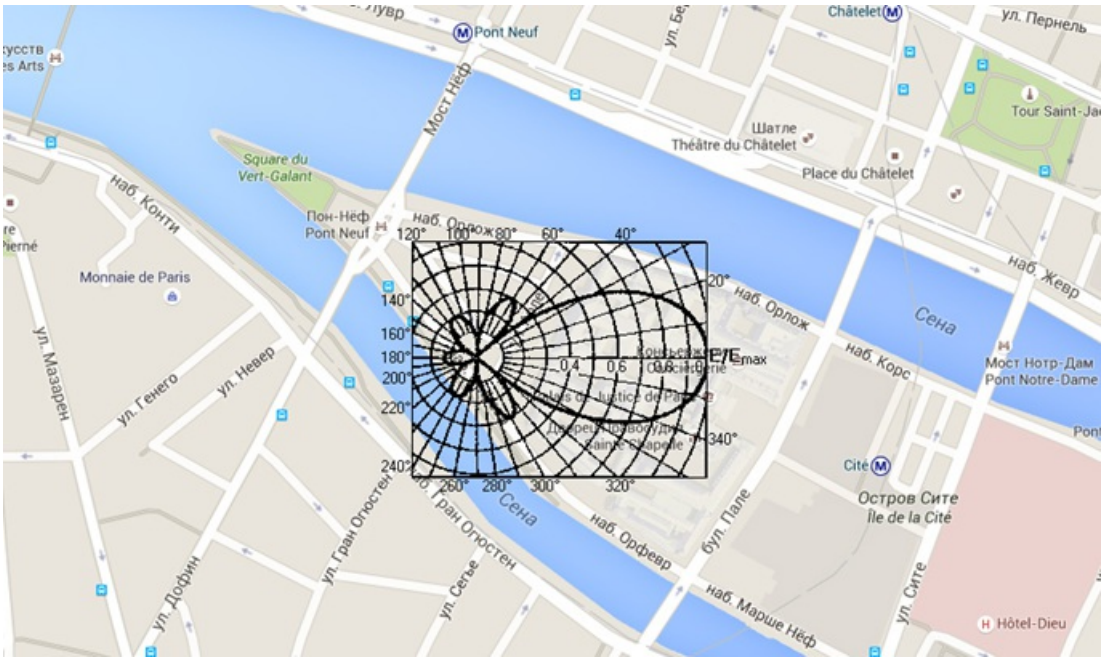

Рисунок 3

Представление диаграммы направленности в прямоугольной системе координат более удобно для инженерных расчетов, такое построение чаще применяется для исследования самой структуры

диаграммы. Для этого диаграммы строят нормированными, с главным максимумом, приведенным к единице. На рисунке ниже приводится типичная нормированная диаграмма направленности зеркальной антенны.

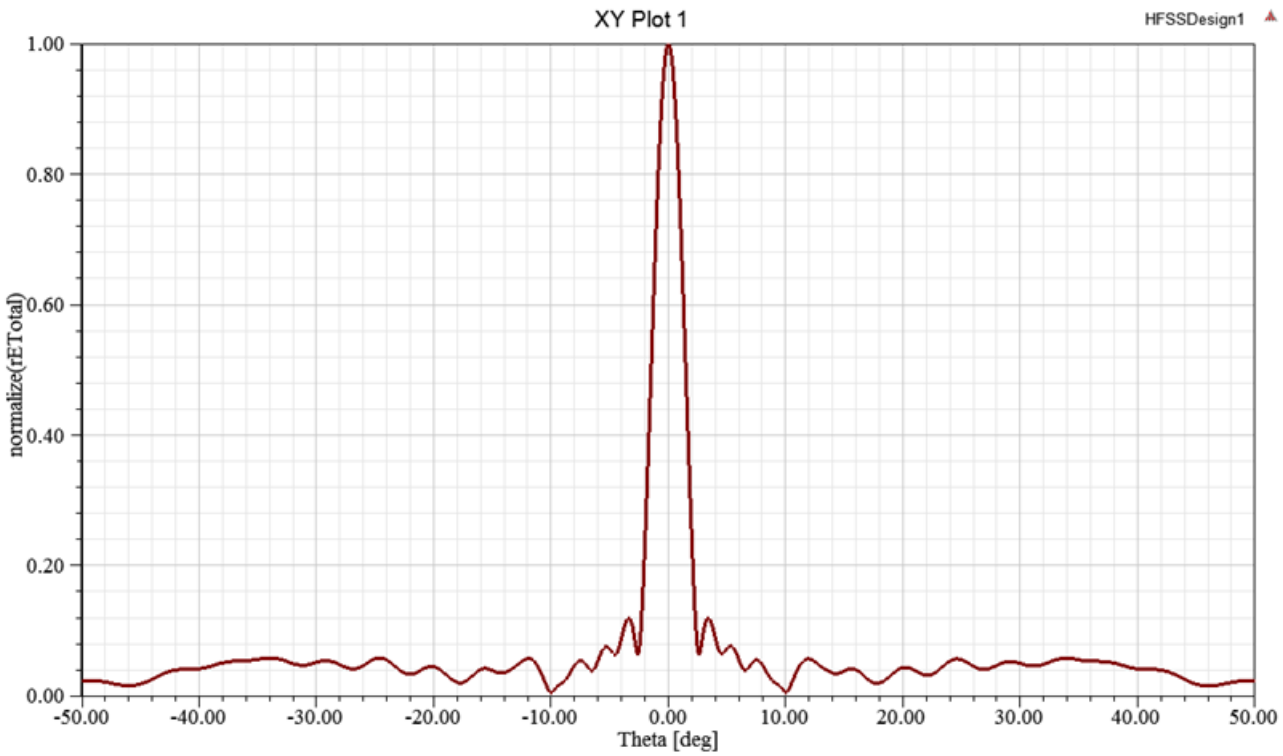

Рисунок 4

В том случае, когда интенсивность бокового излучения довольно небольшая и в линейном масштабе измерение бокового излучения затруднительно, применяют логарифмический масштаб. Как известно децибелы маленькие значения делают большими, а большие – маленькими, поэтому та же самая диаграмма в логарифмическом масштабе выглядит так, как показано ниже:

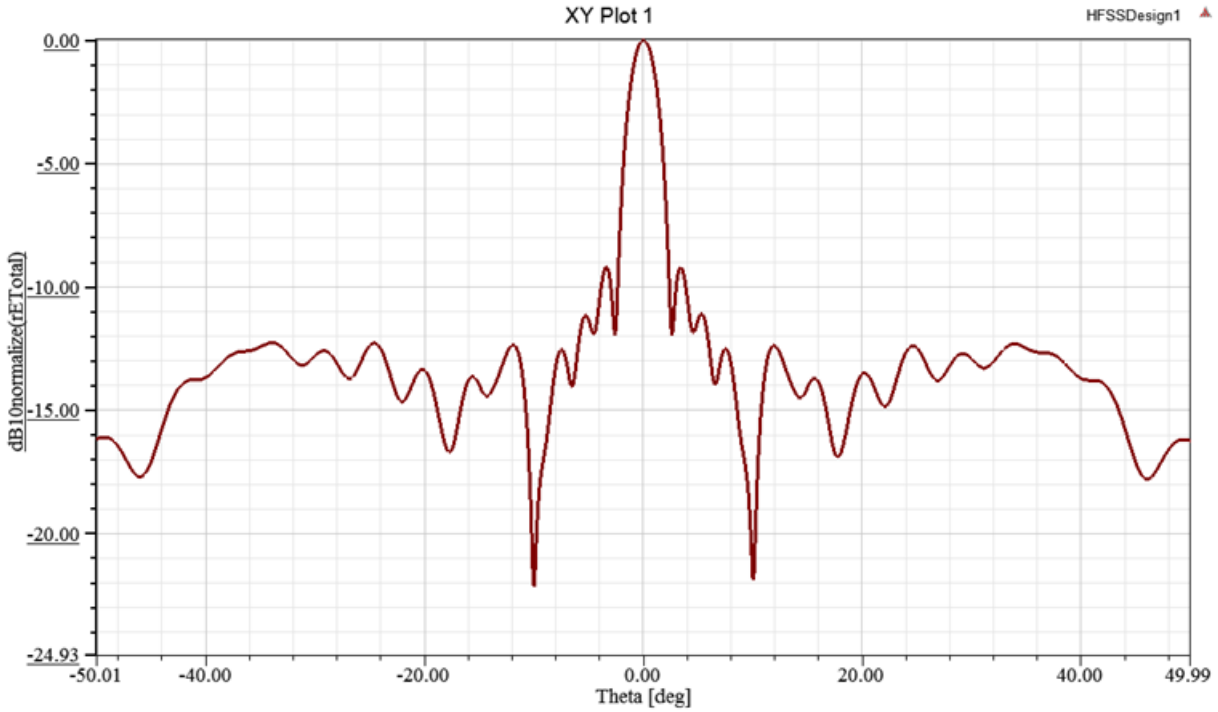

Рисунок 5

Из одной только диаграммы направленности можно вытащить довольно большое количество важных для практики характеристик. Исследуем подробнее диаграмму, изображенную выше.

Один из наиболее важных параметров – это ширина главного лепестка по нулевому излучению θ_0 и

ширина главного лепестка по уровню половинной мощности $\theta_{0,5}$. Половина мощности соответствует уровню 3 дБ, или уровню 0,707 по напряженности поля.

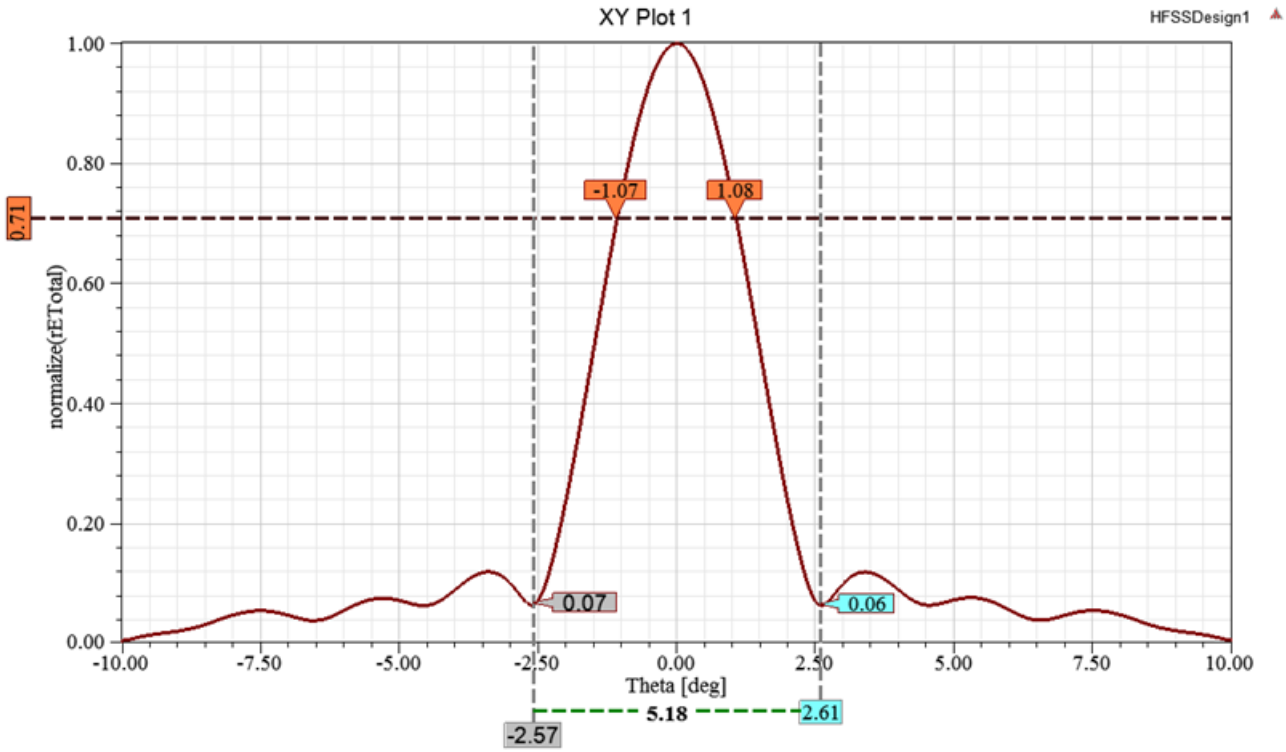

Рисунок 6

Из рисунка 6 видно, что ширина главного лепестка по нулевому излучению составляет θ_0 = 5,18 град, а ширина по уровню половины мощности $\theta_{0,5}$ = 2,15 град.

Также диаграммы оценивают по интенсивности бокового и обратного излучения (мощности боковых и задних лепестков), отсюда вытекает еще два важных параметры антенны – это коэффициент защитного действия, и уровень боковых лепестков.

Коэффициент защитного действия – это отношение напряженности поля, излученного антенной в главном направлении к напряженности поля, излученного в противоположном направлении. Если рассматривают ориентацию главного лепестка диаграммы в направлении на 180 градусов, то обратного – на 0 градусов. Возможны и любые другие направления излучения. Найдем коэффициент защитного действия рассматриваемой диаграммы. Для наглядности изобразим ее в полярной системе координат (рисунок 7):

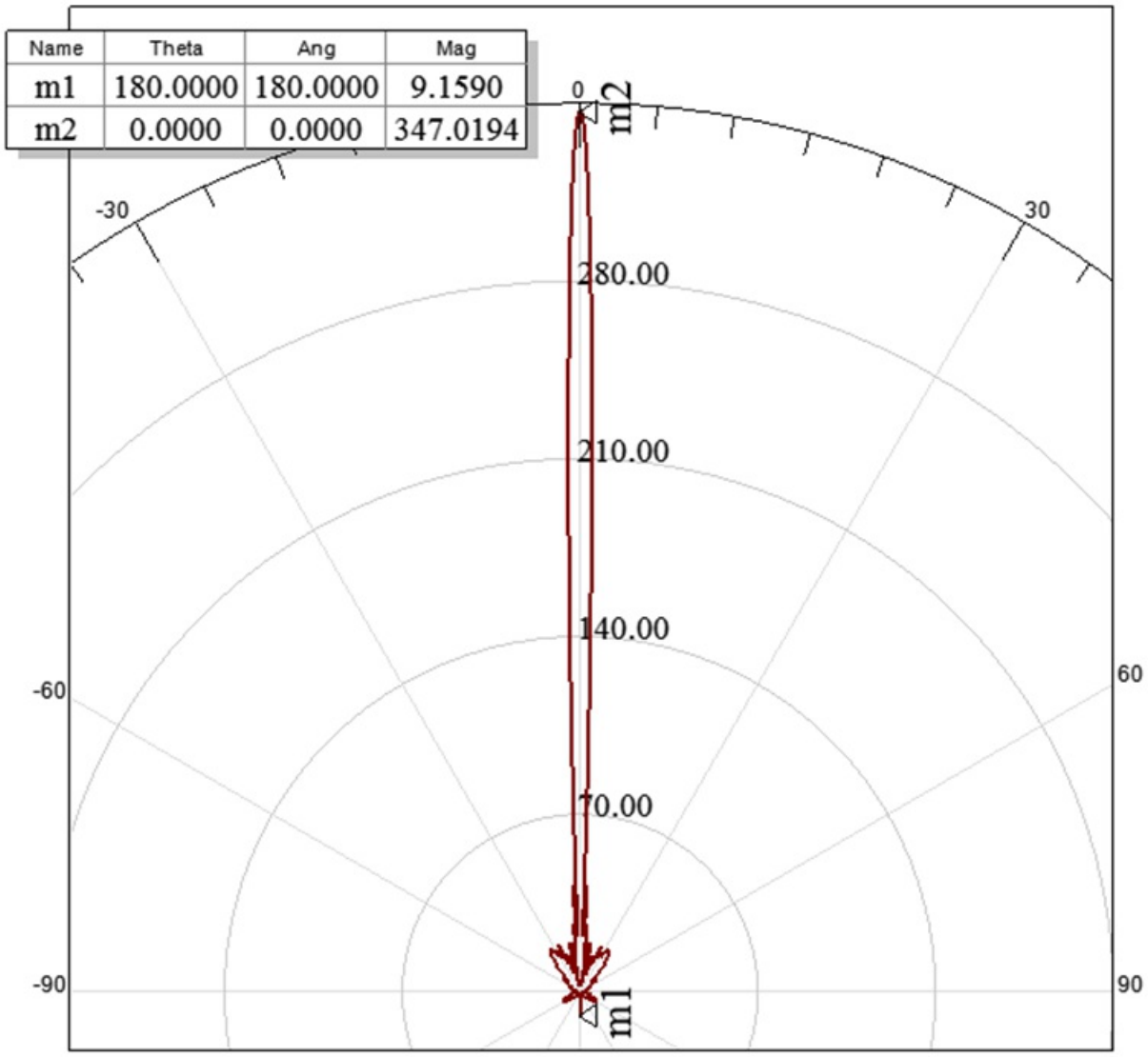

Рисунок 7

На диаграмме маркерами m1,m2 изображены уровни излучения в обратном и прямом направлениях соответственно. Коэффициент защитного действия определяется как:

$$Кз = \frac{347,0194}{9,159} \cong 37,88$$

- в относительных единицах. То же самое значение в дБ:

$$20 \cdot \lg\left(\frac{347,0194}{9,159}\right) = 31,57 \text{ дБ}$$

Уровень боковых лепестков (УБЛ) принято указывать в дБ, показывая тем самым, насколько уровень бокового излучения слаб по сравнению с уровнем главного лепестка, рисунок 8.

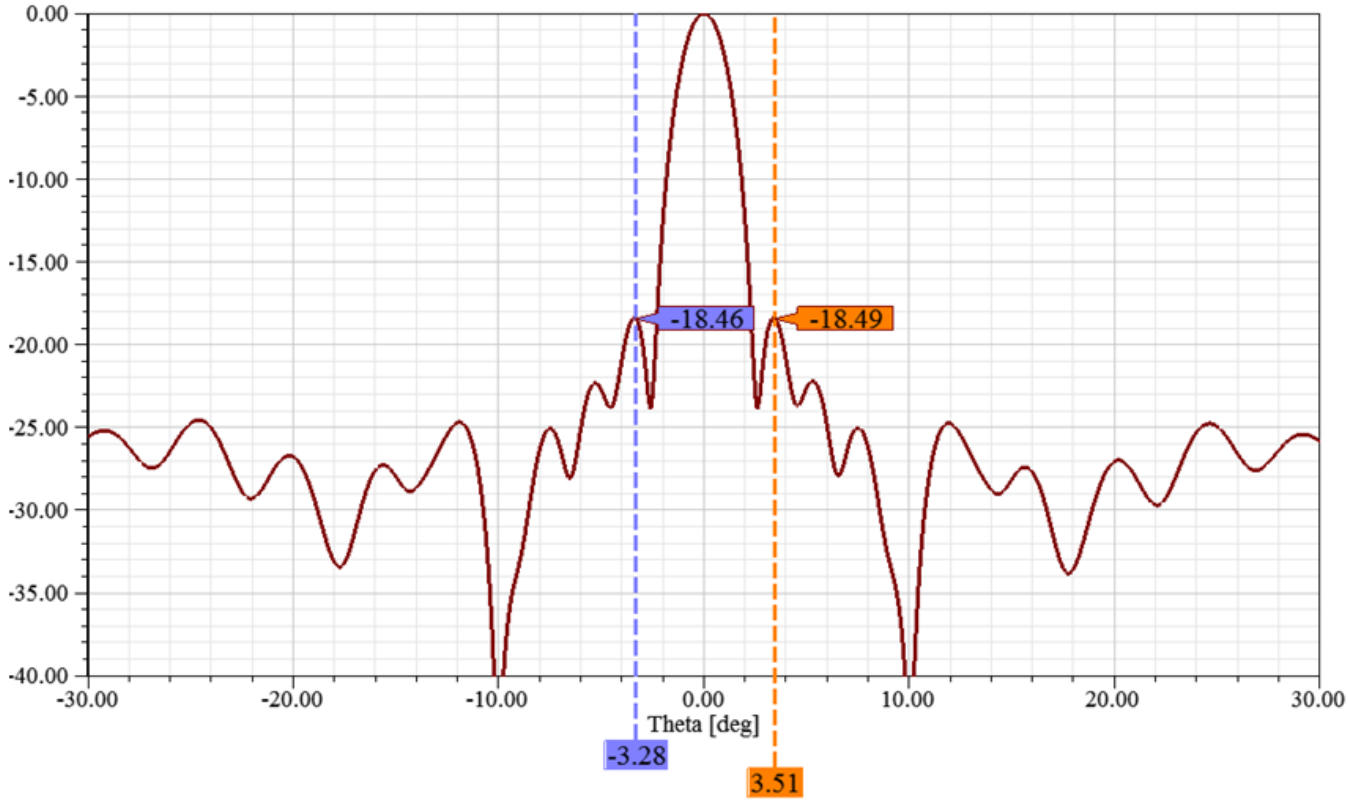

Рисунок 8

УБЛ в районе -18 дБ считается довольно хорошим показателем для высоконаправленной антенны. На рисунке изображены уровни первых боковых лепестков. Аналогично можно указывать также уровни всех последующих, но практической ценности их значение имеет мало, а представляет скорее академический интерес. Дело в том, что первые боковые лепестки находятся как правило "ближе всех остальных" к максимуму диаграммы направленности и могут оказывать помехи. Например, если сопровождение объекта происходит на уровне главного лепестка диаграммы -3дБ, а уровень первого бокового лепестка близок к этому значению (например -5:7 дБ), то велика вероятность начать цеплять объект боковым излучением со всеми вытекающими отсюда последствиями (неправильное позиционирование, потеря объекта и др.). Низкий УБЛ необходим не только для радиолокации, но и для области связи, ведь наличие паразитного излучения это всегда дополнительные помехи.

Коэффициент направленного действия и коэффициент усиления

Это два немаловажных параметра любой антенной системы, которые напрямую вытекают из определения диаграммы направленности. КНД и КУ часто путают между собой. Перейдем к их рассмотрению.

Коэффициент направленного действия

Коэффициент направленного действия (КНД) – это отношение квадрата напряженности поля, созданного в главном направлении (E_0^2), к среднему значению квадрата напряженности поля по всем направлениям ($E_{ср}^2$). Как понятно из определения, КНД характеризует направленные свойства антенны. КНД не учитывает потери, так как определяется по излучаемой мощности. Из сказанного выше можно указать формулу для расчета КНД:

$D=E_0^2/E_{ср}^2$

Если антенна работает на прием, то КНД показывает, во сколько раз улучшится отношение сигнал/шум по мощности, при замене направленной антенны ненаправленной, если помехи приходят равномерно со всех направлений.

Для передающей антенны КНД показывает, во сколько раз нужно уменьшить мощность излучения, если ненаправленную антенну заменить направленной, при сохранении одинаковых напряженностей поля в главном направлении.

КНД абсолютно ненаправленной антенны, очевидно, равно единице. Физически пространственная диаграмма направленности такой антенны выглядит в виде идеальной сферы:

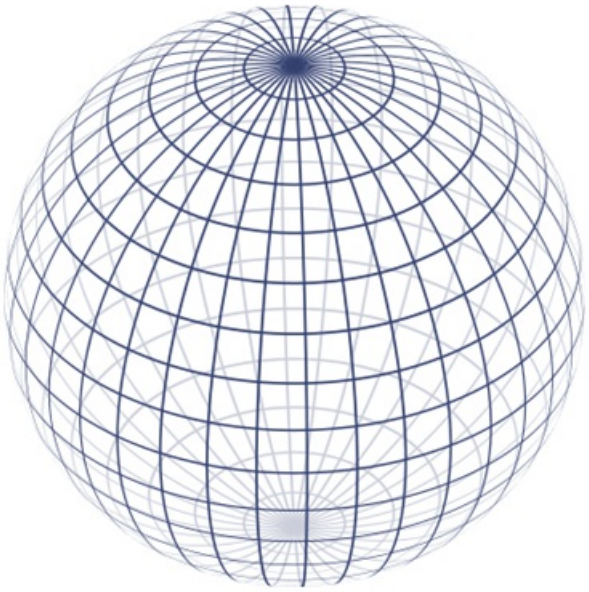

Рисунок 9

Такая антенна одинаково хорошо излучает во всех направлениях, но на практике нереализуема. Поэтому это своего рода математическая абстракция.

Коэффициент усиления

Как уже было сказано выше, КНД не учитывает потери в антенне. Параметр, который характеризует направленные свойства антенны и учитывает потери в ней, называется коэффициентом усиления.

Коэффициент усиления (КУ) G – это отношение квадрата напряженности поля, созданного антенной в главном направлении (E_0^2), к среднему значению квадрата напряженности поля ($E_{оэ}^2$), созданного эталонной антенной, при равенстве подводимых к антеннам мощностей. Также отметим, что при определении КУ учитываются КПД эталонной и измеряемой антенны.

Понятие эталонной антенны очень важно в понимании коэффициента усиления, и в разных частотных диапазонах используют разные типы эталонных антенн. В диапазоне длинных/средних волн за эталон принят вертикальный несимметричный вибратор длиной четверть волны (рисунок 10).

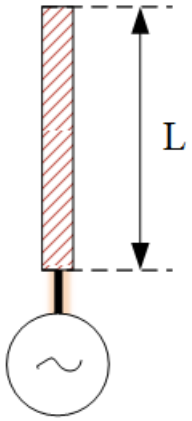

Рисунок 10

Для такого эталонного вибратора $D_{э=3,28}$, поэтому коэффициент усиления длинноволновой/средневолновой антенны определяется через КНД так: $G=D*ŋ/3,28$, где ŋ – КПД антенны.

В диапазоне коротких волн в качестве эталонной антенны принимают симметричный полуволновый вибратор, для которого Dэ=1,64, тогда КУ:

$G=D*\eta/1,64$

В диапазоне СВЧ (а это почти все современные Wi-Fi, LTE и др. антенны) за эталонный излучатель принят изотропный излучатель, дающий $D_э=1$, и имеющий пространственную диаграмму, изображенную на рисунке 9.

Коэффициент усиления является определяющим параметром передающих антенн, так как показывает, во сколько раз необходимо уменьшить мощность, подводимую к направленной антенне, по сравнению с эталонной, чтобы напряженность поля в главном направлении осталась неизменной.

КНД и КУ в основном выражают в децибелах: 10lgD, 10lgG.

Заключение

Таким образом, мы рассмотрели некоторые полевые характеристики антенны, вытекающие из диаграммы направленности и энергетические характеристики (КНД и КУ). Коэффициент усиления антенны всегда меньше коэффициента направленного действия, так как КУ учитывает потери в антенне. Потери могут возникать из-за отражения мощности обратно в линию питания облучателя, затекания токов за стенки (например, рупора), затенение диаграммы конструктивными частями антенны и др. В реальных антенных системах разница между КНД и КУ может составлять 1.5-2 дБ.