**Тема 4. Распространение электромагнитных волн в различных средах**

**Лекция 17.** Электромагнитные волны над земной поверхностью.

# 1. Формула идеальной радиопередачи

Реальные условия распространения сложны и многообразны, поэтому полностью их учесть не представляется возможным. В связи с этим рассмотрим идеализированный случай, т.е. будем рассматривать земную атмосферу как неограниченное свободное пространство. При этом не учитывается ни влияние земли, ни влияние газов атмосферы.

Пусть источником электромагнитной волны в свободном пространстве является антенна. Известны: излучаемая мощность ; нормированная характеристика направленности  и коэффициент направленного действия . Требуется определить напряженность поля  в точке наблюдения , находящейся в дальней зоне.

Для решения задачи воспользуемся рис. 6. Вначале определим максимальную напряженность поля  в точке  на расстоянии  от антенны.



Рис. 6

Такая напряженность может быть создана направленной антенной, если она излучает мощность . Мощность, излучаемую направленной антенной определить по известной средней плотности потока мощности 

, (1)

где  – площадь сферы с центром точке стояния антенны и проходящая через точку 

,

.

Отсюда с учетом 

. (2)

Теперь определим напряженность поля в точке 

. (3)

Если поставить в выражение (3) значение  получим

. (4)

Это выражение называется формулой идеальной радиопередачи. Необходимо выяснить в каких случаях его можно использовать для расчета напряженности поля в реальных условиях.

Формула (4) не учитывает влияния земли. Его нужно учитывать в тех случаях, когда земля облучается прямой волной, если такого облучения нет земля не будет оказывать влияния на напряженность поля в точке наблюдения. Экранирующее действие земли проявляется при нахождении точки наблюдения в области тени. Ослабление волн в тропосфере можно пренебречь, если λ>0.03...0.05 м. Влияние ионосферы проявляется в возникновении пространственных волн λ>5...10 м.

|  |
| --- |
| **Выводы:**  Формула идеальной радиопередачи применима для расчета амплитуды напряженности поля в реальной атмосфере при выполнении следующих условий.  Длина волны электромагнитных колебаний находится в пределах (0,03...0,05) < λ < (5...10) м.  Точка наблюдения лежит в области прямой видимости.  Антенна имеет узкую диаграмму направленности и ориентирована так, что не облучает землю (остронаправленные антенны). |

# 2. Область, существенная для распространения радиоволн. Зоны Френеля

С помощью понятия области, существенной для распространения радиоволн, можно установить условия, при выполнении которых предмет, находящийся в пространстве, окружающим антенну, будет существенно влиять на поле в заданной точке наблюдения.

Областью существенной для распространения радиоволн из точки  в точку  (рис. 7) называется область, охватывающая отрезок прямой  и обладающая тем свойством, что тело достаточно больших размеров, непрозрачное для радиоволн, находясь внутри этой области, оказывает существенное влияние на значение напряженности поля в точке  и такое же тело вне этой области оказывает несущественное влияние на напряженность поля в точке .



Рис. 7

Определим напряженность поля в точке наблюдения с помощью формулы Кирхгофа для плоскости

, (5)

где α - угол между нормалью  к поверхности  и прямой  рис. 7,

 вычисляется по формуле идеальной радиопередачи

.

Если подставить это выражение в (5) получим:

, (6)

где ;

.

Анализируя решение (6) можно прийти к выводу, что для любой плоскости , перпендикулярной линии существует участок  в виде круга (первая зона Френеля), который является существенным для распространения радиоволн, поскольку через этот участок проходит большая часть энергии волны. Радиус участка определяется по формуле

. (7)



Рис. 8

По мере приближения плоскости  к антенне или точке наблюдения радиус  уменьшается. С другой стороны если рассмотреть плоскость, проходящую через линию , то область, в которой распространяется существенная часть энергии, излученной антенной, ограничена эллипсом. Следовательно, область, существенная для распространения радиоволн представляет собой эллипсоид вращения, в одном фокусе которого находится антенна, а в другом – точка наблюдения (рис. 9). Размер поперечного сечения эллипсоида можно определить по формуле (7).



Рис. 9

Тело, непрозрачное для радиоволн, излученной антенной , окажет существенное влияние на напряженность поля в точке наблюдения  если: оно полностью или частично находится внутри существенной области;

размеры сечения части тела плоскостью перпендикулярной  соизмеримы или равны размерам участка .

|  |
| --- |
| **Выводы:**  1.) При распространении радиоволн между антенной и точкой находится область существенная для распространения радиоволн. Сечение этой области картинной плоскостью образует окружность, которая называется первой зоной Френеля.  2.) Радиус первой зоны Френеля увеличивается с увеличением длины волны и максимален в точке равноудаленной от антенны и точки наблюдения. |

# 3. Постановка задачи и ее решение при отражении радиоволн от плоской земной поверхности

Рассмотрим идеализированный случай, при котором будем считать земную поверхность плоской. Это позволяет упростить решение задачи РРВ и соответствует реальной ситуации, когда расстояние от РЛС до цели невелико (несколько десятков километров). Пусть над плоской землей в свободном пространстве установлена антенна, излучающая радиоволны.

Известны: ***P*** – мощность излучения;

***D*** – КНД;

***F(θ)*** – нормированная характеристика направленности;

1. – длина волны;

***εз***, ***μз***, ***σз***, – электрические параметры земли;

положение и ориентация антенны;

поляризация;

положение точки наблюдения.

Требуется определить комплексную амплитуду напряженности поля волны, отраженной от земли в точке наблюдения ***М*** (рис. 1).

Пусть ***ha*** – высота антенны над землей,

***L*** – наибольший линейный размер антенны.

Будем полагать, что

***ha>>λ, ha>>L,*** (1)

то есть земля по отношению к антенне находится в дальней зоне. Введение этого условия упрощает решение задачи.

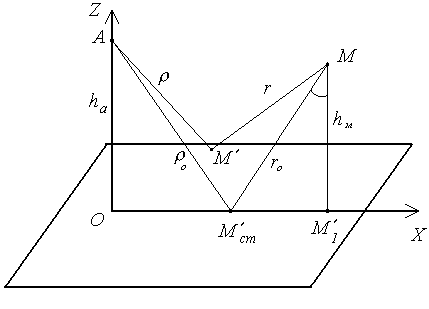


Рис. 1

**Решение задачи** 1. Определим напряженность поля падающей волны на поверхность земли в точке ****.

,

где  - значение характеристики направленности в направлении на точку .

Учитывая условие (1) будем считать падающую на поверхность волну сферической и для нее фазовый множитель будет иметь вид: . Окончательно напряженность поля падающей волны в точке  определим с помощью выражения:

. (2)

2. Определим амплитуду напряженности поля отраженной волны в точке  на поверхности .

. (3)

где  коэффициент отражения в точке .

При этом учитываются следующие закономерности отражения:

а) поляризация отраженной волны такая же, как и падающей;

б) вектор  перпендикулярен к направлению распространения отраженной волны;

в) угол падения волны равен углу отражения.

На рис. 1 показана ориентация вектора , который совпадает с направлением  в точке  для случаев вертикальной () и горизонтальной () поляризации. Теперь перепишем выражение (3) с учетом поляризации отраженной волны.

. (4)

1. На основании полученного значения амплитуды напряжённости поля отраженной волны на поверхности  в точке  определим напряженность поля в точке наблюдения *М*. Для этого следует использовать формулу Кирхгофа для плоскости

, (5)

где  - любая составляющая поля в точке наблюдения ;

 - угол, отсчитываемый от оси *Z* до направления на точку отражения.

Используя выражение (5), подставляя в него значение  из формулы (4) и применяя метод стационарной фазы, получим выражение, описывающее напряженность поля в точке наблюдения *М*

. (6)

где  - точка стационарной фазы;

 - ДН в направлении на ;

 - коэффициент отражения для точки ;

 - единичный вектор, направленный вдоль вектора .

Точка  совпадает с точкой отражения, определяемой законами геометрической оптики.

Проанализируем полученное выражение. Определим тип отраженной волны, для чего найдем уравнение поверхности равных фаз. Фаза напряженности поля, с точностью до слагаемого  равна . Следовательно, поверхность равных фаз удовлетворяет уравнению .

Это уравнение описывает поверхность сферы с центром в точке *А1*, проходящей через точку наблюдения *М* (рис. 2). Точка *А1* представляет собой точку зеркального отображения положения антенны *А* относительно поверхности земли. Отсюда следует, что отраженная волна сферическая.



Рис. 2

В силу законов отражения поляризация прямой волны совпадает с поляризацией сферической отраженной волны. Амплитуда напряженности поля отраженной волны определяется значением ХН в направлении на точку стационарной фазы  и модулем коэффициента отражения.

|  |
| --- |
| **Выводы:**  1.) Поле отраженной волны определяется по формуле идеальной радиопередачи с учетом умножения на коэффициент отражения.  2.) Волна, отраженная от плоской земной поверхности – сферическая. |

# 4. Область, существенная для отражения радиоволн

Ранее полагалось, что отражающая поверхность плоская. Реальная земная поверхность является поверхностью сложной формы с неровностями. Возникает вопрос, при каких условиях влияние неровностей будет мало? Рассмотрим неровность на отражающей поверхности в виде выступа (рис. 3).



Рис. 3

Теперь определим величину неровности, которая может оказать влияние на поле отраженной волны. В соответствии с принципом Гюйгенса каждый элемент  (рис. 3) может рассматриваться как источник элементарной отраженной сферической волны. Фаза напряженности поля волны в точке ***М*** с точностью до слагаемого

***argp=const***равна ***Фн=-k(ρ+r).***

Если неровность отсутствует, то фаза равна ***Фн=-k(ρ’+r’).***

Разность фаз волн, отраженных от неровностей и от идеальной отражающей поверхности определяется выражением

. (7)

Неровности оказывают существенное влияние, если выполняется неравенство

.

На основании рис. 3 можно записать следующие выражения

.

Так как рассматриваемая неровность лежит в пределах близких к точке отражения, то приближенно можно считать ***θ1≈θ2≈θ***. С учетом этого можно записать

. (8)

На основании выводов, сделанных при рассмотрении области существенной для РРВ, можно считать, что область существенная для отражения представляет собой сечение эллипсоида вращения области существенной для распространения волн в точке ***A’*** к точке ***М*** плоскостью ***S*** рис. 4. Границей области является эллипс.

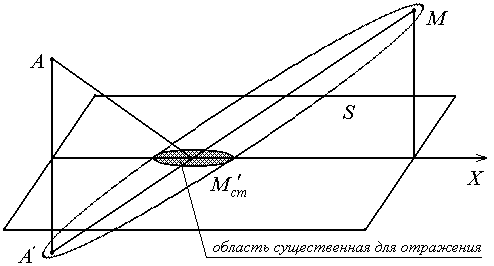


Рис. 4

|  |
| --- |
| **Выводы:**  1. Область существенная для отражения представляет собой часть отражающей поверхности, ограниченной эллипсом. Внутри эллипса лежит точка отражения.   1. Положение и размеры эллипса зависят от положения источника радиоволн и точки наблюдения относительно отражающей поверхности и друг друга. 2. Неровности отражающей поверхности оказывают существенное влияние, если их высота удовлетворяет неравенству (8), и они располагаются в пределах существенной области, а также, если они занимают на существенной области площадь, соизмеримую с ее размерами. Если хотя бы одно из этих условий не выполняется, то землю можно считать плоской. |

# 5. Постановка задачи и ее решение при РРВ над плоской Землей

Пусть в свободном пространстве над плоской землей  находится передающая антенна  (рис. 1).

Известны:  – излучаемая мощность;

 – длина волны;

 – нормированная характеристика направленности;

 – высота подъема антенны над землей.

Определим амплитуду напряженности поля волны, излученной волны, в точке наблюдения . Будем полагать, что

. (1)



Рис. 1

**Решение задачи**

Комплексная амплитуда напряженности электрического поля в точке наблюдения  будет равна сумме напряженностей прямой  и отраженной волны 

. (2)

По формуле идеальной радиопередачи определим амплитуду прямой волны

, (3)

где – единичный вектор, совпадающий с  по направлению.

Величину  определим по формуле

, (4)

где ,

– единичный вектор, совпадающий с  по направлению,

 – коэффициент отражения в точке стационарной фазы,

 – характеристика направленности в направлении на точку стационарной фазы.

Выражения (3) и (4) можно упростить. Векторы и  в точке наблюдения  в общем случае не совпадают. Однако, учитывая условия (1) будем полагать, что угол  стремится к нулю, поэтому эти векторы можно считать параллельными в дальней зоне.

С учетом условия (1) запишем: .

С учетом указанных упрощений, подставляя (3) и (4) в (2) получим:

 (5)

Анализируя рис. 1 можно выразить  в следующем виде: . Учитывая условия (1) считаем, что . Поскольку точи  и  имеют одинаковый азимут, то . С учетом последних замечаний и, используя формулу модуля суммы двух комплексных величин, получим новый вид выражения (5)

. (6)

Формула (6) является решением поставленной задачи. Она описывает напряженность поля в точке наблюдения. Для вычисления основных закономерностей распространения радиоволн над плоской землей необходимо проанализировать выражение (6).

|  |
| --- |
| **Выводы:** Напряженность поля в точке наблюдения образованная прямой и отраженной волной зависит от:   1. характеристики направленности антенны, 2. коэффициента отражения от земной поверхности, 3. от отношения высоты антенны и длины волны. |

# 6. Отражательные формулы и область их применения

Рассмотрим частные случаи, позволяющие упростить формулу (6).

**Случай А.**

Пусть ширина диаграммы направленности антенны больше чем , диаграмма симметрична и ее максимум направлен параллельно земле. В этом случае считаем, что и выражение (6) при  примет вид

. (7)

**Случай Б.**

Если  при всех возможных параметрах земли можно считать

.

При этом выражение (7) преобразуется следующим образом

.

Учитывая, что

,

имеем

. (8)

Полученные выражения (6), (7) и (8) называются отражательными или интерференционными формулами.

|  |
| --- |
| **Выводы:**  Отражательные формулы применимы для расчета напряженности поля в реальных условиях, если выполняются следующие требования.   1. Точка наблюдения находится в пределах области прямой видимости относительно антенны. 2. Длина волны  см, когда можно пренебречь ослаблением и рассеянием радиоволн в тропосфере. 3. Высота антенны  и расстояние между антенной и точкой наблюдения . 4. Угол возвышения точки наблюдения удовлетворяет неравенству, где *a* – радиус земли. 5. В пределах области существенной для отражения, неровности земной поверхности  достаточно малы, т.е. . 6. Удовлетворяются требования, соответствующие случаям А и Б (⇒ширина диаграммы направленности антенны больше чем , диаграмма симметрична и ее максимум направлен параллельно земле; ⇒ и ). |

# 7. Влияние Земли на характеристику направленности антенны

Поскольку распределение напряженности поля, излученного антенной, описывается характеристикой направленности, рассмотрим влияние земли на РРВ как влияние на характеристику направленности.

Воспользуемся выражением (6). Если в нем опустить множители, не зависящие от , получим уравнение характеристики направленности антенны с учетом влияния земли

. (9)

Из этой формулы следует, что в общем, случае характеристика направленности (ХН) с учетом влияния земли представляет собой сложную функцию, зависящую от ХН в вертикальной плоскости без учета влияния земли , а также от отношения , модуля и фазы коэффициента отражения от земли. Анализ функции  затруднителен, поэтому рассмотрим простой частный случай, соответствующей формуле (8). Выведем нормированную ХН

. (10)

Из выражения (8) следует, что

. (11)

Подставим в (10) значение  из (8), а  из (11) получим ХН с учетом влияния земли

, (12)

, (13)

где  – ХН антенны в свободном пространстве;

 – множитель, учитывающий влияние земли.

Чтобы составить представление о влиянии земли построим ХН в полярной (рис. 2) и декартовой (рис. 3) системах координат. При этом вначале зададимся ХН без влияния земли (рис. 2, 3)

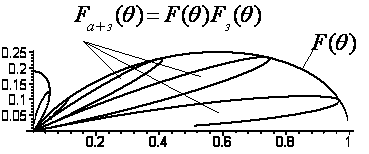


Рис. 2



Рис. 3

Функция  (13) изменяется в зависимости от угла , т.е. она имеет максимумы при

 (14)

 (15)

Таким образом, диаграмма направленности имеет многолепестковый характер с провалами до нуля (рис. 2).

Проанализируем выражение (9). Если антенны ориентирована так, что излучение в направлении земли мало, а в направлении на точку наблюдения значительно, то

.

Пренебрегая слагаемым содержащим , получим

,

это положение справедливо для РЛС сопровождения целей.

|  |
| --- |
| **Выводы:**   1. Земля оказывает влияние на ХН антенны, если она облучается главным лепестком. 2. За счет влияния земли диаграмма направленности антенны приобретает многолепестковый характер. Причем провалы в диаграмме достигают нулевого уровня, если земля облучается главным лепестком. 3. В направлении линии горизонта характеристика направленности равна нулю, что затрудняет обнаружение низколетящих целей. 4. При горизонтальном полете цели в направлении РЛС ее угол места увеличивается. Так как ХН имеет многолепестковый характер, это приводит к флуктуации отраженного сигнала. 5. Направление первого лепестка ДН антенны с учетом влияния земли определяется соотношением (14) при  и зависит от отношения . Чтобы прижать первый лепесток к земле необходимо либо поднимать антенну над поверхностью земли либо уменьшать . С другой стороны это приводит к увеличению лепестков ХН или изрезанности ХН. |