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 P; нормированная характеристика направленности $F(\theta)$ и коэффициент направленного действия D. Требуется определить напряженность поля $E(M)$ в точке наблюдения M , находящейся в дальней зоне.

Для решения задачи воспользуемся рис. 6. Вначале определим максимальную напряженность поля $E_{макс}(M_0)$ в точке M_0 на расстоянии r от антенны.

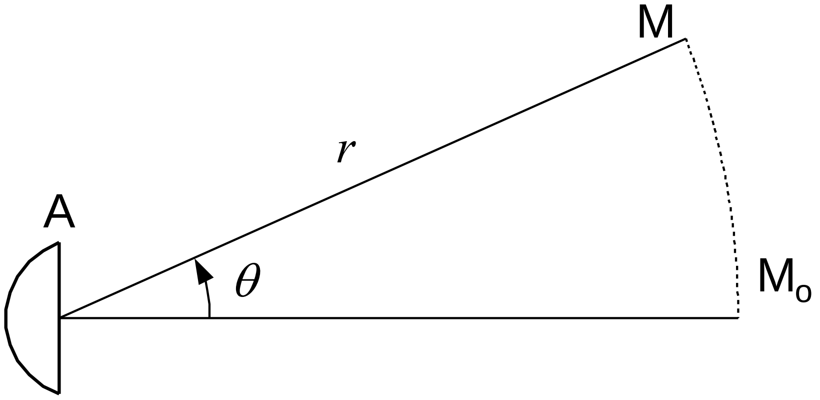

Рис. 6

Такая напряженность может быть создана направленной антенной, если она излучает мощность $P_0 = PD$. Мощность, излучаемую направленной антенной определить по известной средней плотности потока мощности $\left|\vec{\Pi}\right|$

$$P_0 = \left|\vec{\Pi}\right| S_{сф}, \tag{1}$$

где $S_{сф}$ – площадь сферы с центром точке стояния антенны и проходящая через точку M_0

$$\left|\vec{\Pi}\right| = \frac{E_{макс}^2}{240\pi},$$

$$P_0 = \frac{E_{макс}^2}{240\pi} 4\pi r^2 = \frac{E_{макс}^2 r^2}{60}.$$

Отсюда с учетом $P_0 = PD$

$$E_{макс}(M_0) = \frac{\sqrt{60PD}}{r}. \quad (2)$$

Теперь определим напряженность поля в точке M

$$E(M) = E_{макс}(M_0) F(\theta). \quad (3)$$

Если поставить в выражение (3) значение $E_{макс}(M_0)$ получим

$$E(M) = \frac{\sqrt{60PD}}{r} F(\theta). \quad (4)$$

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 $\lambda > 0.03...0.05$ м. Влияние ионосферы проявляется в возникновении пространственных волн $\lambda > 5...10$ 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) $< \lambda <$ (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 A в точку M (рис. 7) называется область, охватывающая отрезок прямой AM 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 M и такое же тело вне этой области оказывает несущественное влияние на напряженность поля в точке M .

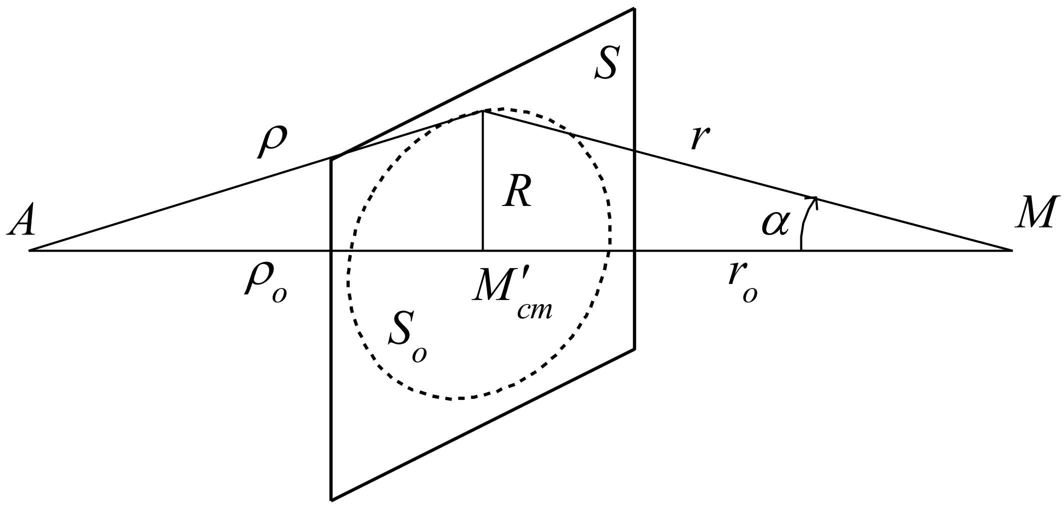

Рис. 7

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

$$U(M) = \frac{ik}{2\pi} \int_S U(M') \cos\alpha \frac{e^{-ikr}}{r} ds, \tag{5}$$

где α - угол между нормалью $\vec{n}$ к поверхности S и прямой MM' рис. 7,

$U(M')$ вычисляется по формуле идеальной радиопередачи

$$U(M') = E_0 F(M') \frac{e^{-ik\rho}}{\rho}.$$

Если подставить это выражение в (5) получим:

$$U(M) = \frac{ik}{2\pi} E_0 \int_S F_U(M') e^{-ik\varphi(M')} ds, \tag{6}$$

где $F_U(M') = \dfrac{F(M')\cos\alpha}{\rho r}$;

$\varphi(M') = -(\rho + r)$.

Анализируя решение (6) можно прийти к выводу, что для любой плоскости S, перпендикулярной линии AM существует участок S_0 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

$$R=\sqrt{\frac{\lambda r_o \rho_o}{2(r_o+\rho_o)}}\,. \tag{7}$$

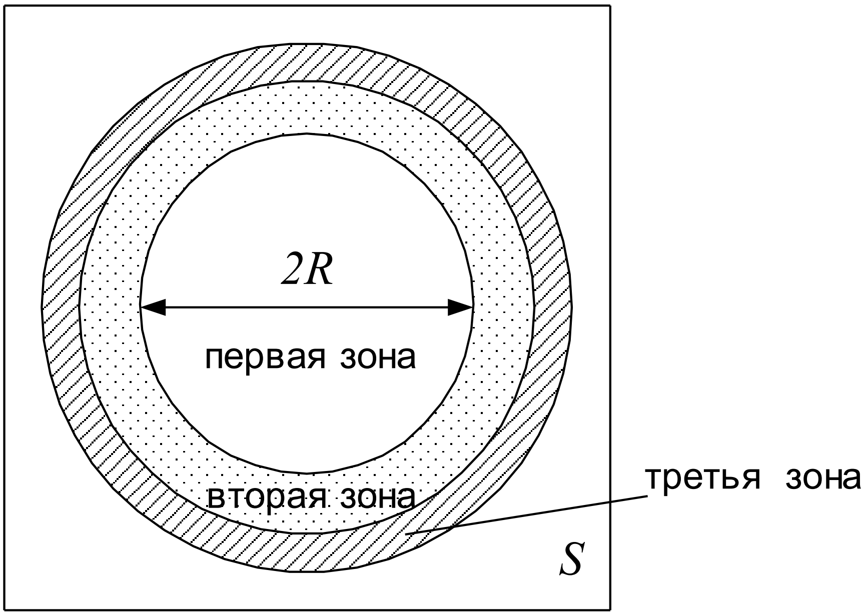

Рис. 8

По мере приближения плоскости S к антенне или точке наблюдения радиус R уменьшается. С другой стороны если рассмотреть плоскость, проходящую через линию AM, 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).

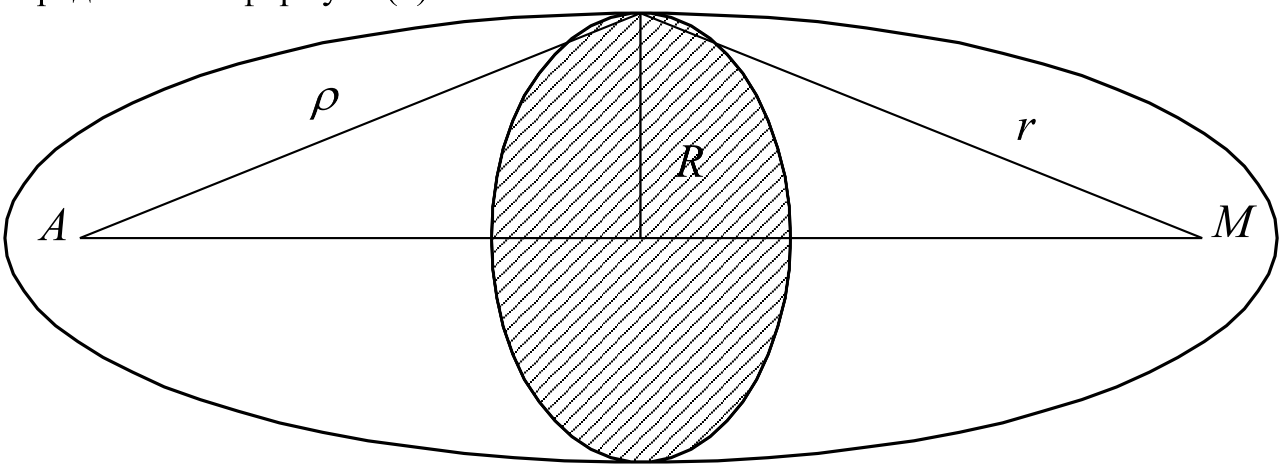

Рис. 9

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

размеры сечения части тела плоскостью перпендикулярной AM соизмеримы или равны размерам участка S_0.

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: $\boldsymbol{P}$ – мощность излучения;

$\boldsymbol{D}$ – КНД;

$\boldsymbol{F(\theta)}$ – нормированная характеристика направленности;

λ – длина волны;

$\boldsymbol{\varepsilon_з}$, $\boldsymbol{\mu_з}$, $\boldsymbol{\sigma_з}$, – электрические параметры земли;

положение и ориентация антенны;

поляризация;

положение точки наблюдения.

Требуется определить комплексную амплитуду напряженности поля волны, отраженной от земли в точке наблюдения $\boldsymbol{M}$ (рис. 1).

Пусть $\boldsymbol{h_a}$ – высота антенны над землей,

$\boldsymbol{L}$ – наибольший линейный размер антенны.

Будем полагать, что

$$h_a \gg \lambda,\ h_a \gg L, \tag{1}$$

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

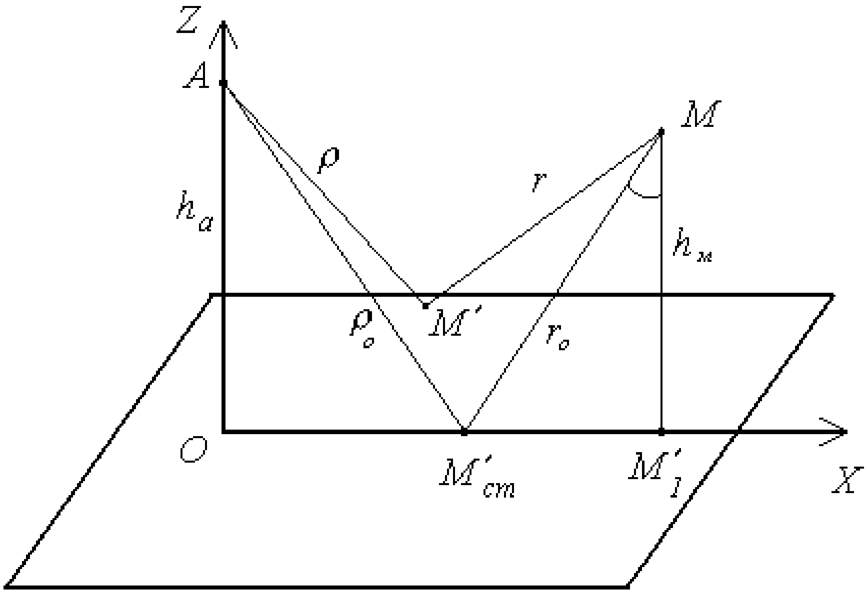

Рис. 1

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

$$E_n(M') = \frac{\sqrt{60*P*D}}{\rho} * F(M'),$$

где $F(M')$ - значение характеристики направленности в направлении на точку M'.

Учитывая условие (1) будем считать падающую на поверхность волну сферической и для нее фазовый множитель будет иметь вид: $e^{-ik\rho}$. Окончательно напряженность поля падающей волны в точке M' определим с помощью выражения:

$$E_n(M') = \frac{\sqrt{60*P*D}}{\rho} * F(M') * e^{-ik\rho}. \quad (2)$$

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

$$E_{отр}(M') = \frac{\sqrt{60*P*D}}{\rho} * P(M') * F(M') * e^{-ik\rho}. \quad (3)$$

где $P(M')$ коэффициент отражения в точке M'.

При этом учитываются следующие закономерности отражения:

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

б) вектор $\vec{E}_{отр}$ перпендикулярен к направлению распространения отраженной волны;

в) угол падения волны равен углу отражения.

На рис. 1 показана ориентация вектора $\vec{l}^{\,o}$, который совпадает с направлением $\vec{E}_{отр}$ в точке M' для случаев вертикальной ($\vec{l}^{\,o} = \vec{l}^{\,o}{}_{в}$) и горизонтальной ($\vec{l}^{\,o} = \vec{l}^{\,o}{}_{г}$) поляризации. Теперь перепишем выражение (3) с учетом поляризации отраженной волны.

$$\vec{E}_{отр}\left(M'\right) = \frac{\sqrt{60*P*D}}{\rho} * P\left(M'\right) * F\left(M'\right) * e^{-ik\rho}\vec{l}^{\,o}. \qquad (4)$$

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

$$U\left(M\right) = \frac{ik}{2\pi}\int\limits_{s_n} U\left(M'\right)\cos\alpha \frac{e^{ikr}}{r} ds, \qquad (5)$$

где $U\left(M\right)$ - любая составляющая поля в точке наблюдения M';

$\alpha = \dfrac{\pi}{2} - \theta$ - угол, отсчитываемый от оси *Z* до направления на точку отражения.

Используя выражение (5), подставляя в него значение $\vec{E}_{отр}\left(M'\right)$ из формулы (4) и применяя метод стационарной фазы, получим выражение, описывающее напряженность поля в точке наблюдения *M*

$$\vec{E}_{отр}\left(M\right) = \sqrt{60PD} * P\left(M'_{ст}\right) * F\left(M'_{ст}\right) * \frac{e^{-ik(\rho_o + r_o)}}{\rho_o + r_o}\vec{l}_{ст}^{\,o}. \qquad (6)$$

где $M'_{ст}$ - точка стационарной фазы;

$F\left(M'_{ст}\right)$ - ДН в направлении на $M'_{ст}$;

$P\left(M'_{ст}\right)$ - коэффициент отражения для точки $M'_{ст}$;

$l'^{\,o}{}_{ст}$ - единичный вектор, направленный вдоль вектора $\vec{E}_{отр}\left(M'_{ст}\right)$.

Точка $M'_{ст}$ 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 $\arg P(M'_{ст}) = const$

равна $-k(\rho_o + r_o),\ k = const$. Следовательно, поверхность равных фаз удовлетворяет уравнению $\rho_o + r_o = const$.

Это уравнение описывает поверхность сферы с центром в точке A_1, проходящей через точку наблюдения M (рис. 2). Точка A_1 представляет собой точку зеркального отображения положения антенны A относительно поверхности земли. Отсюда следует, что отраженная волна сферическая.

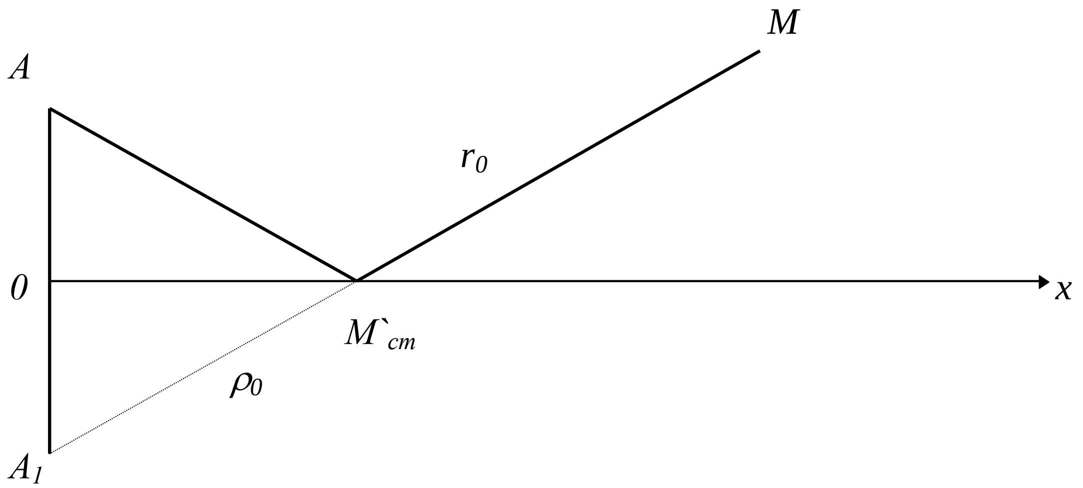

Рис. 2

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 $F\left(M'_{cm}\right)$ 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).

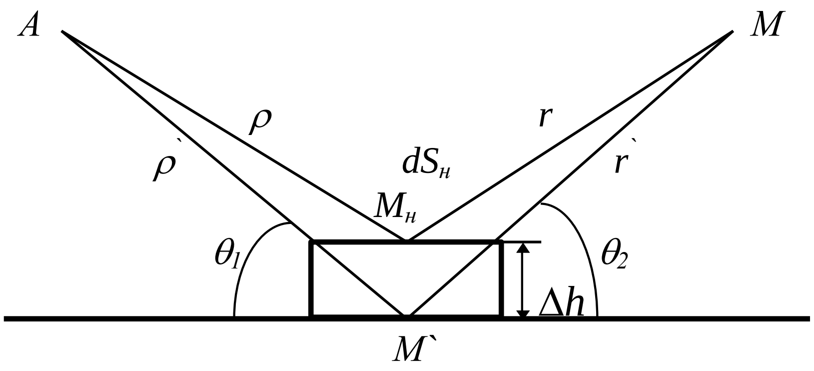

Рис. 3

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

argp=const равна $\boldsymbol{\Phi_н=-k(\rho+r)}$.

Если неровность отсутствует, то фаза равна $\boldsymbol{\Phi_н=-k(\rho'+r')}$.

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

$$\Delta\Phi=\Phi_н-\Phi=k\Big[\big(\rho'-\rho\big)+\big(r'-r\big)\Big]. \tag{7}$$

Неровности оказывают существенное влияние, если выполняется неравенство

$$\Delta\Phi=k\Big[\big(\rho'-\rho\big)+\big(r'-r\big)\Big]\geq\frac{\pi}{2}.$$

На основании рис. 3 можно записать следующие выражения

$$\rho'-\rho=\Delta h\ \sin\theta_1;\ \ r'-r=\Delta h\ \sin\theta_2.$$

Так как рассматриваемая неровность лежит в пределах близких к точке отражения, то приближенно можно считать $\boldsymbol{\theta_1\approx\theta_2\approx\theta}$. С учетом этого можно записать

$$\Delta h\geq\frac{\lambda}{8\sin\theta}. \tag{8}$$

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 ***M*** плоскостью ***S*** рис. 4. Границей области является эллипс.

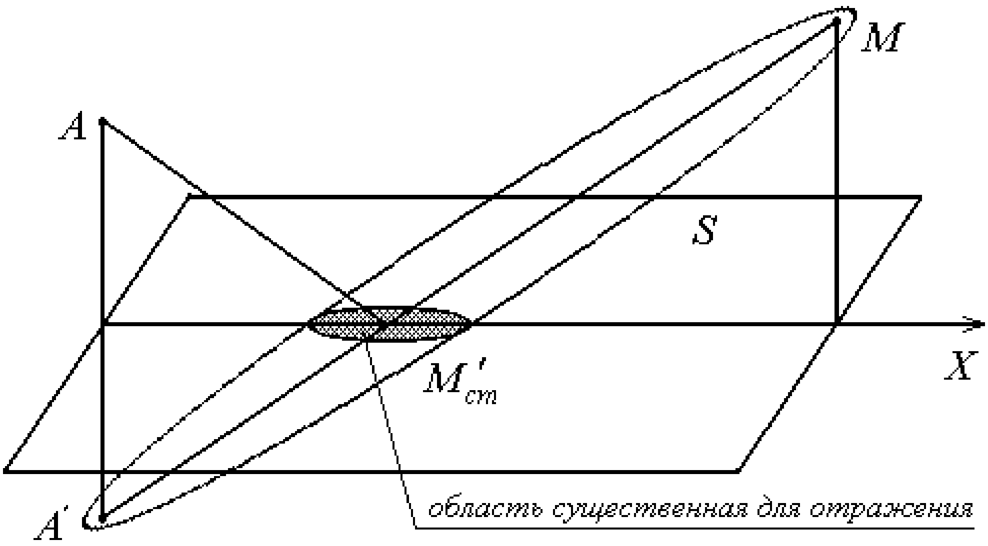

Рис. 4

Выводы:

1. Область существенная для отражения представляет собой часть отражающей поверхности, ограниченной эллипсом. Внутри эллипса лежит точка отражения.
2. Положение и размеры эллипса зависят от положения источника радиоволн и точки наблюдения относительно отражающей поверхности и друг друга.
3. 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 S находится передающая антенна A (рис. 1).

Известны: P – излучаемая мощность;

λ – длина волны;

$F(\theta,\varphi)$ – нормированная характеристика направленности;

h_a – высота подъема антенны над землей.

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

$$h_a >> \lambda, \quad r >> h_a. \tag{1}$$

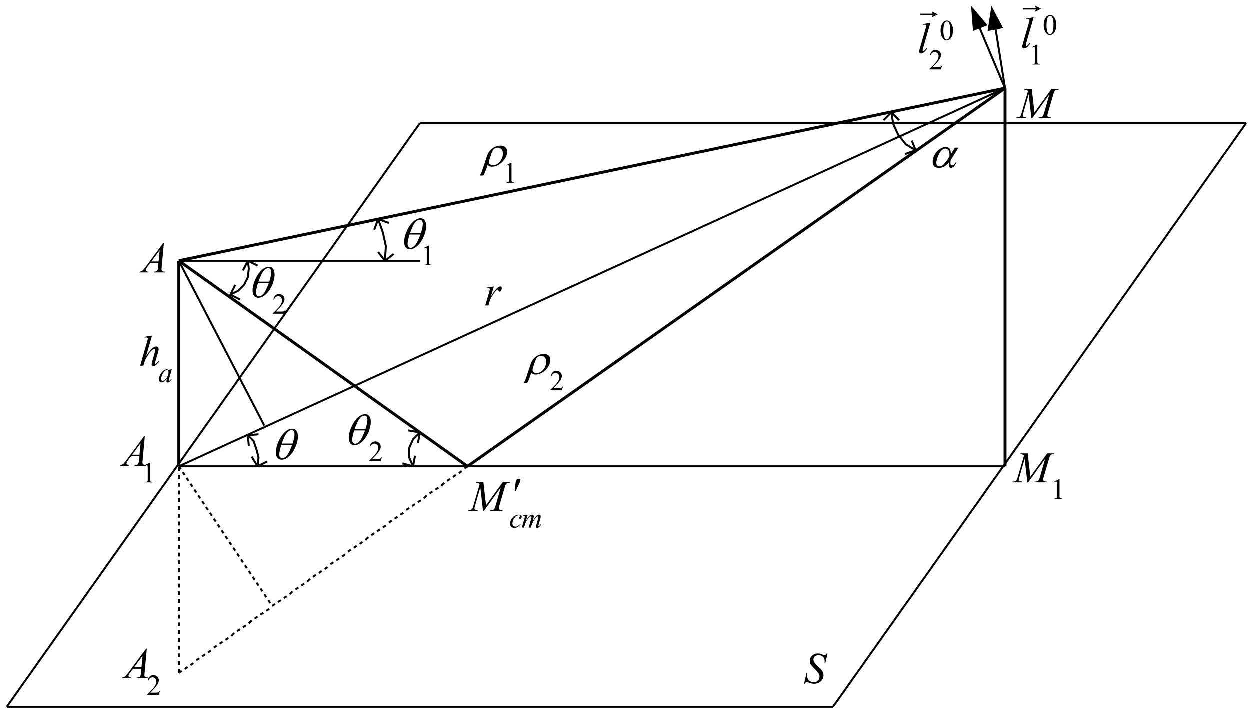

Рис. 1

Решение задачи

Комплексная амплитуда напряженности электрического поля в точке наблюдения M будет равна сумме напряженностей прямой $\vec{E}_1$ и отраженной волны $\vec{E}_2$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \tag{2}$$

По формуле идеальной радиопередачи определим амплитуду прямой волны

$$\vec{E}_1 = \frac{\sqrt{60PD}}{\rho_1} F(M) e^{-ik\rho_1} \vec{l}_1^{\,0}, \tag{3}$$

где $\vec{l}_1^{\,0}$ – единичный вектор, совпадающий с $\vec{E}_1$ по направлению.

Величину $\vec{E}_2$ определим по формуле

$$\vec{E}_2 = \frac{\sqrt{60PD}}{\rho_2} P(M'_{cm}) F(M'_{cm}) e^{-ik\rho_2} \vec{l}_2^{\,0}, \tag{4}$$

где $\rho_2 = A_2 M$,

$\vec{l}_2^{\,0}$ – единичный вектор, совпадающий с $\vec{E}_2$ по направлению,

$P(M'_{cm})$ – коэффициент отражения в точке стационарной фазы,

$F(M'_{cm})$ – характеристика направленности в направлении на точку стационарной фазы.

Выражения (3) и (4) можно упростить. Векторы $\vec{l}_1^{\,0}$ и $\vec{l}_2^{\,0}$ в точке наблюдения M в общем случае не совпадают. Однако, учитывая условия (1) будем полагать, что угол α стремится к нулю, поэтому эти векторы можно считать параллельными в дальней зоне.

С учетом условия (1) запишем: $\rho_1 = \rho_2 = r$.

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

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{60PD}}{r}\left[F(M) + P(M'_{cm})F(M'_{cm})e^{-ik(\rho_2-\rho_1)}\right]e^{-ik\rho_1}\vec{l}_1^{\,0}. \qquad (5)$$

Анализируя рис. 1 можно выразить $(\rho_2 - \rho_1)$ в следующем виде: $\rho_2 \approx r + h_a sin\theta_2;\ \ \rho_1 = r - h_a sin\theta_1;\ \ \rho_2 - \rho_1 = 2h_a sin\theta$. Учитывая условия (1) считаем, что $\theta_1 \approx |\theta_2| \approx \theta$. Поскольку точи M и M'_{cm} имеют одинаковый азимут, то $F(M) = F(\theta),\ F(M'_{cm}) = F(\theta_2)$. С учетом последних замечаний и, используя формулу модуля суммы двух комплексных величин, получим новый вид выражения (5)

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{60PD}}{r}\sqrt{F^2(\theta) + |P|^2 F^2(\theta_2) + 2|P|F(\theta)F(\theta_2)\cos(\frac{4\pi h_a}{\lambda}\sin\theta + \arg P)}\ \vec{l}_1^{\,0}. \qquad (6)$$

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:

* характеристики направленности антенны,
* коэффициента отражения от земной поверхности,
* 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 $\theta_2 + \theta_1$, диаграмма симметрична и ее максимум направлен параллельно земле. В этом случае считаем, что и выражение (6) при $F(\theta) \approx F(\theta_2)$ примет вид

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{60PD}}{r}F(\theta)\sqrt{1 + |P|^2 + 2|P|\cos(\frac{4\pi h_a}{\lambda}\sin\theta + \arg P)}\ \vec{l}_1^{\,0}. \qquad (7)$$

Случай Б.

Если $\theta \leq 45...60^0$ при всех возможных параметрах земли можно считать

$$\left|P\right|\approx 1,\ \ arg\,P\approx\pi\,.$$

При этом выражение (7) преобразуется следующим образом

$$\vec{E}=\frac{\sqrt{60PD}}{r}F(\theta)\sqrt{2-2\cos(\frac{4\pi h_a}{\lambda}\sin\theta)}\,\vec{l}_1^{\,0}.$$

Учитывая, что

$$1-\cos(\frac{4\pi h_a}{\lambda}\sin\theta)=2\sin^2(\frac{2\pi h_a}{\lambda}\sin\theta),$$

имеем

$$\vec{E}=\frac{2\sqrt{60PD}}{r}F(\theta)\sin(\frac{2\pi h_a}{\lambda}\sin\theta)\,\vec{l}_1^{\,0}. \qquad (8)$$

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.

Точка наблюдения находится в пределах области прямой видимости относительно антенны.

Длина волны $\lambda > 3...5$ см, когда можно пренебречь ослаблением и рассеянием радиоволн в тропосфере.

Высота антенны $h_a >> \lambda$ и расстояние между антенной и точкой наблюдения $r >> h_a$.

Угол возвышения точки наблюдения удовлетворяет неравенству $\theta > \dfrac{0.5...0.7}{\sqrt{\pi a/\lambda}}$, где a – радиус земли.

В пределах области существенной для отражения, неровности земной поверхности Δh достаточно малы, т.е. $\Delta h \le \dfrac{\lambda}{8\sin\theta}$.

Удовлетворяются требования, соответствующие случаям А и Б (⇒ширина диаграммы направленности антенны больше чем $\theta_2+\theta_1$, диаграмма симметрична и ее максимум направлен параллельно земле; ⇒ $\theta \le 45...60^0$ и $\left|P\right|\approx 1,\ \ arg\,P\approx\pi$).

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 θ, получим уравнение характеристики направленности антенны с учетом влияния земли

$$f_{a+3}(\theta)=\sqrt{F^2(\theta)+|P|^2F^2(\theta_2)+2|P|F(\theta)F(\theta_2)\cos(\frac{4\pi h_a}{\lambda}\sin\theta+\arg P)}\,. \tag{9}$$

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 $F(\theta)$, а также от отношения h_a/λ, модуля и фазы коэффициента отражения от земли. Анализ функции $f_{a+з}(\theta)$ затруднителен, поэтому рассмотрим простой частный случай, соответствующей формуле (8). Выведем нормированную ХН

$$F_{a+з}(\theta)=\frac{f_{a+з}(\theta)}{f_{a+з\,\max}(\theta)}=\frac{E(\theta)}{E_{\max}(\theta)}. \tag{10}$$

Из выражения (8) следует, что

$$E_{max}=\frac{2\sqrt{60PD}}{r}. \tag{11}$$

Подставим в (10) значение $E(\theta)$ из (8), а $E_{max}(\theta)$ из (11) получим ХН с учетом влияния земли

$$F_{a+з}(\theta)=F(\theta)F_з(\theta), \tag{12}$$

$$F_з(\theta)=\left|\sin\left(\frac{2\pi h_a}{\lambda}\sin\theta\right)\right|, \tag{13}$$

где $F(\theta)$ – ХН антенны в свободном пространстве;

$F_з(\theta)$ – 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)

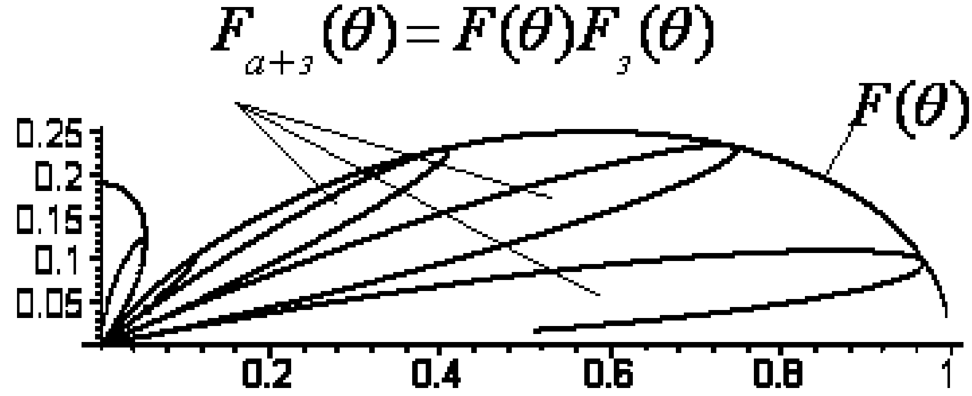

Рис. 2

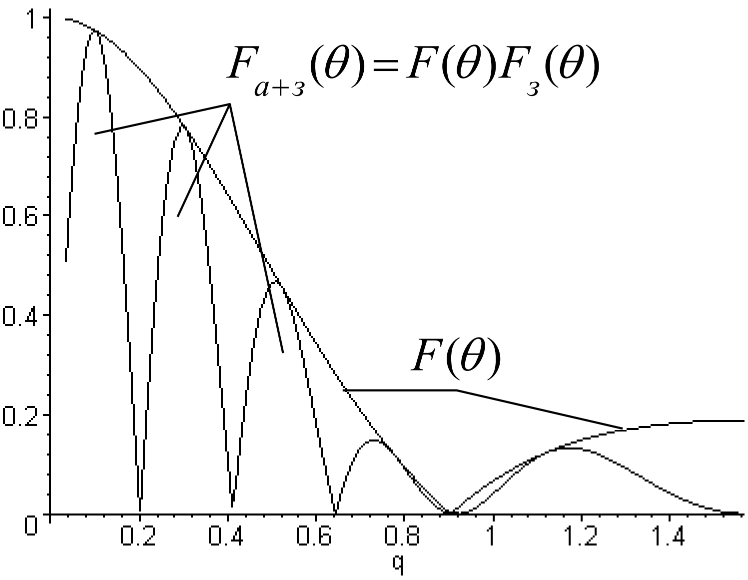

Рис. 3

Функция $F_1(\theta)$ (13) изменяется в зависимости от угла θ, т.е. она имеет максимумы при

$$\frac{2\pi h_a}{\lambda}\sin\theta_{\max}=(2n+1)\frac{\pi}{2},\quad n=0,1,2,... \tag{14}$$

$$\frac{2\pi h_a}{\lambda}\sin\theta_{\min}=m\pi,\quad m=0,1,2,... \tag{15}$$

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

$$F(\theta_2)<<F(\theta).$$

Пренебрегая слагаемым содержащим $F(\theta_2)$, получим

$$F_{a+з}(\theta)=F(\theta),$$

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 $n=0$ и зависит от отношения h_a/λ. Чтобы прижать первый лепесток к земле необходимо либо поднимать антенну над поверхностью земли либо уменьшать λ. С другой стороны это приводит к увеличению лепестков ХН или изрезанности ХН.