

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НАД ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Цель работы:

- изучение особенностей процесса распространения радиоволн над земной поверхностью при поднятых приемной и передающей антеннах;
- экспериментальная проверка интерференционных формул.

### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

В случаях, когда высоты подъема передающей антенны  $h_1$  и приемной антенны  $h_2$  значительно превышают рабочую длину радиоволн  $\lambda_0$ , земля не оказывает влияние на электрические свойства антенн, но может существенно изменять условие распространения радиоволн (РРВ).

Рассмотрим трассу, на которой антенны находятся на расстоянии прямой видимости (рис.1). При этом радиосвязь осуществляется за счет прямой и отраженной от поверхности земли радиоволн. При анализе обычно упрощают решение задачи РРВ, полагая первоначально, что поверхность земли достаточно гладкая (высоты неровностей удовлетворяют критерию Релея) и плоская. Напряженность поля в точке приема будет определяться интерференцией прямой и отраженной радиоволн

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{E}_{\text{пр}} + \vec{E}_{\text{отр}} \quad (1)$$

Прямая радиоволна распространяется в свободном пространстве, поэтому напряженность поля, создаваемая ею в точке наблюдения, равна (1)

$$\vec{E}_{\text{пр}} = j \frac{\sqrt{60PG_M}}{r_{\text{пр}}} F(\beta) \exp(-jkr_{\text{пр}}) \quad (2)$$

где  $P$  - мощность, подводимая к передающей антенне;  
 $G_M$  - максимальное значение коэффициента усиления передающей антенны;  $F(\beta)$  - значение нормированной функции направленности

передающей антенны для угла  $\beta$  между направлением максимума диаграммы направленности (ДН) и направлением на точку приема;  $k$  - волновое число для свободного пространства. Напряженность поля отраженной волны в точке наблюдения, очевидно, равна

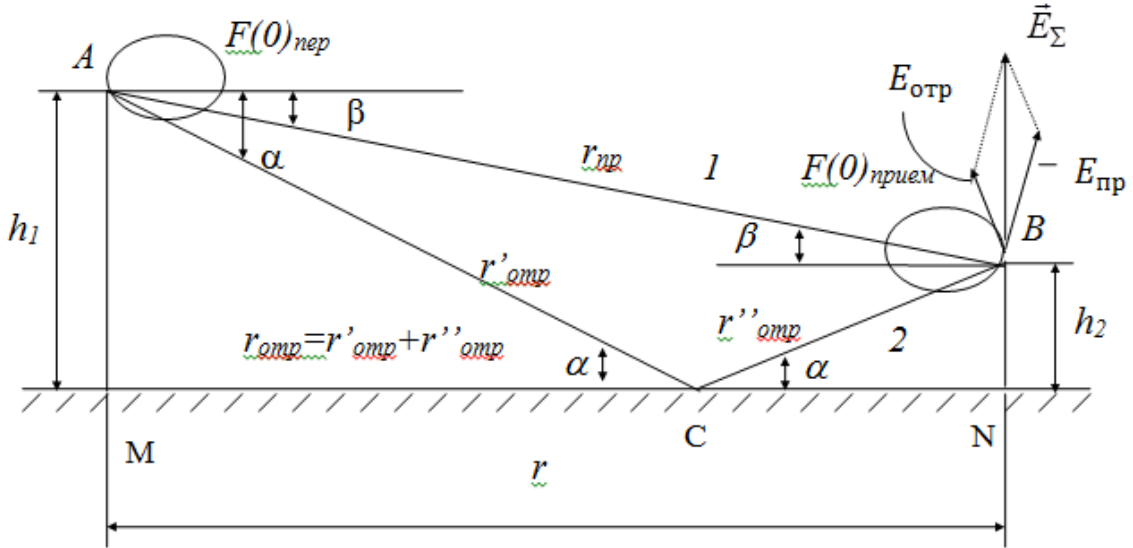


Рис. 1. Интерференция прямой (1) и отраженной (2) волн.

A - передающая антенна, B - приемная антенна,

C - точка зеркального отражения

$$\vec{E}_{отр} = j\dot{\Gamma}(\alpha) \frac{\sqrt{60PG_M}}{r_{отр}} F(\alpha) \exp(-jkr_{отр}) \quad (3)$$

где  $\dot{\Gamma}(\alpha)$  - комплексное значение коэффициента отражения радиоволн от земной поверхности для угла скольжения  $\alpha$ ;  $\alpha$  - угол между направлением максимума ДН передающей антенны и направлением на точку зеркального отражения C (см. рис.1).

Предположим, что максимум ДН передающей антенны ориентирован параллельно поверхности земли, передающая антенна излучает, а приемная антенна принимает волны, у которых  $\vec{E}$  ориентирован нормально относительно поверхности земли. Учитывая из (1) только составляющие, которые могут быть приняты, можно записать, используя (2) и (3)

$$\begin{aligned} \vec{E}_\Sigma = j \frac{\sqrt{60PG_M}}{r_{пр}} F(\beta) \exp(-jkr_{пр}) \cos\beta \\ + j\dot{\Gamma}(\alpha) \frac{\sqrt{60PG_M}}{r_{отр}} F(\alpha) \exp(-jkr_{отр}) \cos\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

На реальных трассах расстояние  $r$  между антеннами велико по сравнению с высотами антенн и разница расстояний  $r_{np}$  и  $r_{отр}$ , выраженная в долях от  $r$ , незначительна, хотя может по абсолютной величине превышать  $\lambda_0$ . Поэтому в знаменателях (4) можно с небольшой погрешностью положить  $r_{np} \approx r_{отр} \approx r$ . Кроме того, из простейших геометрических соотношений, следующих из рис.1, можно получить ряд приближенных выражений:

$$r_{np} \approx r + \frac{(h_1 - h_2)^2}{2r}; \quad r_{отр} \approx r + \frac{(h_1 + h_2)^2}{2r} \quad (5)$$

$$\cos\beta \approx 1 - \frac{(h_1 - h_2)^2}{2r^2}; \quad \cos\alpha \approx 1 - \frac{(h_1 + h_2)^2}{2r^2} \quad (6)$$

Учитывая (5) в фазовых членах (4), а также, используя (6), преобразуем (4) к виду

$$\begin{aligned} \vec{E}_\Sigma = j \frac{\sqrt{60PG_M}}{r} F(\beta) \exp(-jkr_{np}) & \left\{ \left[ 1 - \frac{(h_1 - h_2)^2}{2r^2} \right] \right. \\ & \times \left[ 1 + \dot{\Gamma}(\alpha) \left( 1 - \frac{2h_1h_2}{r^2} \right) \frac{F(\alpha)}{F(\beta)} \exp(-jkr_{отр} + jkr_{np}) \right] \Bigg\} \quad (7) \end{aligned}$$

Обозначим комплексное выражение, стоящее в фигурных скобках через  $\Phi(h_1, h_2, r)$ , оно получило название интерференционного множителя. Тогда (7) представляется в виде

$$\vec{E}_\Sigma = j \frac{\sqrt{60PG_M}}{r} F(\beta) \exp(-jkr_{np}) \Phi(h_1, h_2, r) \quad (8)$$

Формула (8) отличается от (2), представляющей формулу радиопередачи в свободном пространстве, лишь сомножителем  $\Phi(h_1, h_2, r)$ . Следовательно, вводя интерференционный множитель можно учесть влияние земли на РРВ при высоко поднятых антеннах, находящихся на расстоянии прямой видимости.

Свойства земной поверхности на трассе распространения учитываются в интерференционном множителе коэффициентом

отражения  $\dot{\Gamma}(\alpha)$ , определяемым формулой Френеля для параллельной поляризации. Поскольку в реальных случаях земля обладает потерями, то коэффициент отражения является комплексным (1) и с учетом сделанных приближений равен

$$\dot{\Gamma} = \frac{(\varepsilon - j60\sigma\lambda_0) \frac{(h_1 + h_2)}{r} - \sqrt{\varepsilon - 1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{r^2} - j60\sigma\lambda_0}}{(\varepsilon - j60\sigma\lambda_0) \frac{(h_1 + h_2)}{r} + \sqrt{\varepsilon - 1 + \frac{(h_1 + h_2)^2}{r^2} - j60\sigma\lambda_0}} = |\dot{\Gamma}| \exp(j\psi) \quad (9)$$

где  $\varepsilon, \sigma$  - относительная диэлектрическая проницаемость и электропроводность земли;  $\psi$  - фаза коэффициента отражения.

Используя (5) и (9), выражение для интерференционного множителя можно привести к более удобному виду

$$\Phi(h_1, h_2, r) = \left[ 1 - \frac{(h_1 - h_2)^2}{2r^2} \right] \times \left[ 1 + |\dot{\Gamma}|^2 \left( 1 - \frac{4h_1h_2}{r^2} \right) \frac{F^2(\alpha)}{F^2(\beta)} + 2|\dot{\Gamma}| \left( 1 - \frac{2h_1h_2}{r^2} \right) \frac{F(\alpha)}{F(\beta)} \cos \left( \frac{2kh_1h_2}{r^2} + \psi \right) \right]^{1/2} \times \exp(j\varphi) \quad (10)$$

где  $\varphi$  - фаза интерференционного множителя.

Если  $r \gg h_1h_2$  и для радио связи используются слабонаправленные антенны, то (10) еще более упрощается

$$\Phi(h_1, h_2, r) = \left[ 1 + |\dot{\Gamma}|^2 + 2|\dot{\Gamma}| \cos \left( \frac{2kh_1h_2}{r^2} + \psi \right) \right]^{1/2} \exp(j\varphi) \quad (11)$$

При анализе влияния земли на РРВ обычно рассматривают лишь модуль интерференционного множителя. Если высота подъема передающей антенны и расстояние между антеннами являются постоянными величинами, то интерференционный множитель становится функцией  $h_2$ . Он принимает максимальное значение

$$|\Phi(h_2)|_{\text{макс}} = 1 + |\dot{\Gamma}| \quad (12)$$

если

$$\frac{2kh_1h_2}{r} + \psi = 2\pi n, n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (13)$$

и минимальное значение

$$|\Phi(h_2)|_{\text{мин}} = 1 - |\dot{\Gamma}| \quad (14)$$

если

$$\frac{2kh_1h_2}{r} + \psi = (2n + 1)\pi, n = 0,1,2,3 \dots \quad (15)$$

Как видно, численное значение  $\Phi(h_1, h_2, r)$  в значительной степени определяется фазой коэффициента отражения  $\psi$ , следовательно, видом отражающей поверхности земли.

Обычно параметры земли в разных точках на расстоянии между передающей и приемной антеннами значительно различаются. Но в формировании отраженной волны принимает участие лишь небольшая область земной поверхности, называемая участком, существенным для отражения радиоволн, расположенная вблизи точки зеркального отражения. Участок, существенный для отражения радиоволн, по форме представляет эллипс, большая ось которого ориентирована по направлению между антеннами, и практически, совпадает с первой зоной Френеля, построенной для отраженной волны. При вычислении необходимо учитывать свойства земной поверхности лишь в пределах этого участка.

Интерференция прямой и отраженной волн в точке приема является, обычно, вредным явлением, ухудшающим радиосвязь. Наиболее сильно это явление наблюдается в диапазоне метровых волн. Для уменьшения влияния земли на РРВ можно использовать остронаправленные антенны.

Зависимость  $\Phi(h_1, h_2, r)$  может быть определена экспериментально. Для этого необходимо снять зависимость величины принятого сигнала  $u(h_2)$  от высоты подъема приемной антенны. Максимальная величина принятого сигнала в соответствии с (11) и (12) равна

$$u_{\text{макс}} = k_n \frac{\sqrt{60PG_M}}{r} F(\beta)(1 + |\dot{\Gamma}|) \quad (16)$$

где  $k_n$  - коэффициент передачи приемного устройства.

Минимальная величина сигнала равна

$$u_{\text{макс}} = k_n \frac{\sqrt{60PG_M}}{r} F(\beta)(1 - |\dot{\Gamma}|) \quad (17)$$

Таким образом

$$|\dot{\Phi}(h_2)| = \frac{2u}{u_{\text{макс}} + u_{\text{мин}}} \quad (18)$$

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Функциональная схема лабораторной установки показана на рис.3. Установка содержит СВЧ генератор, фидерный тракт, передающую антенну в виде  $H$  - секториального рупора, приемную рупорную антенну, сигнал с выхода которой детектируется и подается на индикатор. Нормированная функция направленности передающей антенны описывается выражением

$$F(\theta) = \frac{1 + \cos\theta}{2} \times \frac{\sin\left(\frac{\pi b}{\lambda_0} \sin\theta\right)}{\frac{\pi b}{\lambda_0} \sin\theta} \quad (19)$$

где  $b = 8\text{мм}$ .

Между передающей и приемной антеннами установлен ящик с сухим песком ( $\varepsilon=4$ ;  $\sigma=10$  сим/м.), имитирующим сухую почву. Поверх песка можно положить тонкий металлический лист, имитирующий поверхность морской воды.

Приемная антенна установлена на подвижном основании. Что позволяет изменять высоту ее подъема.

Работа поставлена в 3-см диапазоне длин волн, что, пользуясь принципом электродинамического подобия, позволило имитировать реальные условия РРВ на трассе малых размеров ( $h_1=5\text{см}$ ;  $r=70\text{см}$ ;  $h_2=2,5\text{-}23\text{см}$ .).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Включить СВЧ генератор и индикатор в соответствии с инструкциями по их эксплуатации. Прогреть приборы в течение 10 - 15 минут.

### 1. Измерение зависимости модуля интерференционного множителя от высоты подъема приемной антенны

1.1. Убрать с трассы металлический лист. Выровнять поверхность песка.

1.2. Установить и записать в таблицу №1 значение рабочей частоты  $f_1$  колебаний, вырабатываемых генератором.

1.3. Настроить СВЧ генератор на максимальную выходную мощность.

1.4. Установить приемную антенну в крайнее нижнее положение.

1.5. Отсчитать показание  $u_0$  индикатора, соответствующее начальной высоте приемной антенны, и результат занести в таблицу 1.

Таблица 1

$f_1 =$						
$u_0 =$						
$h_2(\text{мм})$	$h_2$	$h_2+5$	$h_2+10$	$h_2+15$	...	$h_2+n$
$u(h_2)$						
$ \dot{\Phi}(h_2) $						
$f_2 =$						
$u_0 =$						
$h_2(\text{мм})$	$h_2$	$h_2+5$	$h_2+10$	$h_2+15$	...	$h_2+n$
$u(h_2)$						
$ \dot{\Phi}(h_2) $						
$f_3 =$						
$u_0 =$						
$h_2(\text{мм})$	$h_2$	$h_2+5$	$h_2+10$	$h_2+15$	...	$h_2+n$
$u(h_2)$						
$ \dot{\Phi}(h_2) $						

1.6. Перемещая приемную антенну вверх, отсчитывать и заносить в таблицу №1 показания индикатора, соответствующие каждой высоте  $h_2$ .

1.7. Установить на СВЧ генераторе частоту  $f_2$ , отличающуюся от частоты  $f_1$  на 250 - 300 МГц. Значение частоты  $f_2$  занести в таблицу №1. Настроить СВЧ генератор на частоте  $f_2$  на максимальную выходную мощность.

1.8. Выполнить п.п.1.4 - 1.6. на частоте  $f_2$ . Результаты занести в таблицу №1.

1.9. Установить на СВЧ генераторе частоту  $f_3$ , отличающуюся от частоты  $f_1$  и  $f_2$  не менее чем на 250-300 МГц. Значение частоты  $f_3$  занести в таблицы №1. Настроить СВЧ генератор на частоте  $f_3$

на максимальную выходную мощность.

1.10. Выполнить п.п.1.4.-1.6. на частоте  $f_3$ . Результаты занести в таблицу №1.

1.11. Положить на трассу металлический лист.

1.12. Выполнить п.п.1.2.-1.10. на тех же частотах и занести значения в таблицу №2 по аналогии с таблицей №1.

Примечание: показания индикаторного прибора  $u_0$  пропорциональны квадрату напряженности поля, действующей у приемной антенны, поэтому для дальнейшего следует вычислить значение  $u = \sqrt{u(h_2)/u_0}$  и по ним рассчитать зависимость  $|\Phi(h_2)|$ , пользуясь (18).

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Функциональная схема установки.
3. Таблицы с экспериментальными результатами.
4. Графики, построенные по данным таблиц №1 и №2. Графики для одинаковой частоты строить на одном листе.
5. Расчетный график, построенный по (10) для одной из частот для идеально отражающей поверхности трассы и для песка. Расчет рекомендуется выполнить на компьютере. При ручном расчете следует пользоваться (11). Графики нанести на лист с соответствующими эмпирическими зависимостями.
6. Выводы по проделанной работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить причину изменения величины принятого сигнала при изменении высоты подъема приемной антенны.
2. Как влияет вид поверхности трассы на величину принятого сигнала?
3. Что такое «участок, существенный для отражения радиоволн»? Как можно определить его размеры экспериментальным и расчетным путями?
4. Для каких диапазонов радиоволн применимы представления, используемые в лабораторной работе?
5. Нарисовать и пояснить интерференционные ДН для вертикального и горизонтального вибраторов.
6. Как учитывается сферичность земной поверхности в интерференционных формулах?



## **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Красюк Н.П., Дымович Н.Д. Электродинамика и распространение радиоволн.- М.: Высшая школа, 1974.
2. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. - М.: Связь, 1975.