

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра радиотехнических систем (РТС)

Утверждаю:  
зав. кафедрой РТС,  
профессор, д.т.н.  
\_\_\_\_\_ С.В. Мелихов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

**ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ**

**ЧАСТЬ 1**

Учебно-методическое пособие по лабораторному практикуму  
для студентов специальности 210601.65 (11.05.01)  
«Радиоэлектронные системы и комплексы»

Разработчик:  
ассистент каф. РТС, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ Ф.Н. Захаров  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. МОЩНОСТЬ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА. Часть 1 .....	3
1.1 Основные определения.....	3
1.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве .....	6
1.3 Дальность прямой видимости.....	7
1.4 Задание на лабораторную работу .....	8
1.5 Рекомендации по выполнению лабораторной работы .....	9
1.6 Содержание отчёта .....	9
1.7 Контрольные вопросы .....	10
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. МОЩНОСТЬ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА. Часть 2 .....	10
2.1 Задание на лабораторную работу .....	10
2.2 Рекомендации по выполнению лабораторной работы .....	10
2.3 Содержание отчёта .....	10
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЛИНИИ СВЯЗИ... 11	
3.1 Дальность действия линии связи в свободном пространстве.....	11
3.2 Задание на лабораторную работу .....	11
3.3 Рекомендации по выполнению лабораторной работы .....	12
3.4 Содержание отчёта .....	12
3.5 Контрольные вопросы .....	12
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ .....	12
4.1 Напряжённость электрического поля в свободном пространстве .....	12
4.2 Влияние земли на амплитуду напряжённости поля .....	13
4.3 Задание на лабораторную работу .....	14
4.4 Рекомендации по выполнению лабораторной работы .....	15
4.5 Содержание отчёта .....	15
4.6 Контрольные вопросы .....	15
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	16

## 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## МОЩНОСТЬ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА.

## Часть 1

**Цель работы:** изучение некоторых понятий теории распространения радиоволн и изучение факторов, влияющих на мощность принимаемого сигнала.

## 1.1 Основные определения

**Электромагнитная волна** – синусоидальное электромагнитное колебание в пространстве. Общепринятое сокращение – **ЭМВ**. Электромагнитная волна – это свет, тепловые лучи невидимого инфракрасного диапазона, рентгеновские лучи и радиоволны. Разница лишь в мощности колебаний и длине волны. Электромагнитная волна состоит из электрического и магнитного синусоидальных колебаний (векторы  $E$  и  $H$ , соответственно). Эти два вида колебаний ориентированы в пространстве друг относительно друга перпендикулярно – ровно на 90 градусов (см. рис. 1.1).

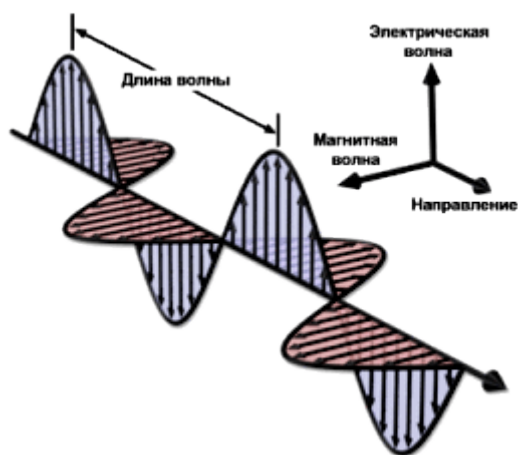


Рис. 1.1. Электромагнитная волна

**Радиоволнами** принято называть электромагнитные волны в диапазоне частот от  $3 \cdot 10^3$  Гц до  $3 \cdot 10^{12}$  Гц, что соответствует длине волны от 100 км до 0,1 мм. Напомним, что длина волны связана с частотой колебаний формулой

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – длина радиоволны (метры),  $f$  – частота радиоволны (герцы),  $c$  – скорость распространения радиоволны в вакууме, равная скорости света  $c = 299\,792\,458$  м/с.

**Источником радиоволны** может быть любой электрический проводник, в котором движется переменный электрический ток. На практике, источником радиоволны является высокочастотный генератор, колебательная энергия которого, распространяется в пространство через радиоантенну. Первым действующим источником радиоколечаний, изобретённым человеком и используемым с очевидным и рациональным успехом, был радиопередатчик-радиоприёмник (см. рис. 1.2) **Александра Степановича Попова**, использующий в качестве высокочастотного генератора – высоковольтный накопитель с искровым разрядником, подключенным на антенну - обыкновенный вибратор Герца.



Александр Степанович Попов  
(1859 – 1905 гг.)

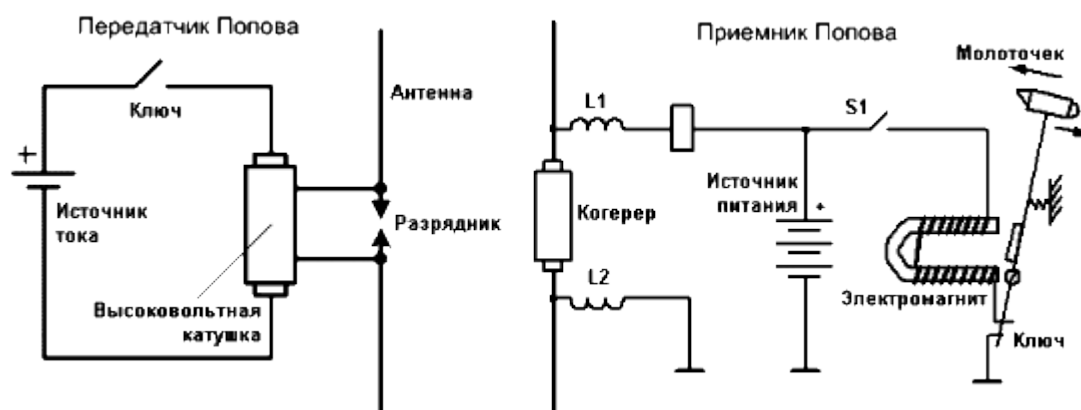


Рис. 1.2. Радиопередатчик-радиоприёмник Попова

**Когерер** в современном понимании — это резистор, сопротивление которого по командам управления принимает только крайние значения. Такой элемент в электронике называется ключом. В отличие от обычного ключа с одним входом управления, для смены состояния когерера используются два входа управления с сигналами разной физической природы: для выполнения команды «ВКЛ» нужно подать электрический импульс напряжения на выводы когерера, а для выполнения команды «ВЫКЛ» нужен механический удар по его корпусу. С помощью такого ключа можно фиксировать короткий электрический импульс, не опасаясь пропустить это событие. В первых приёмниках радиоимпульсов беспроводного телеграфа использовались оба входа управления этого электромеханического ключа.

Влияние среды, в которой (или над которой) распространяются радиоволны, накладывает ограничение на длины волн, применяемых в практике радиосвязи. Отметим, что внешние факторы на распространение радиоволн различной длины сказываются неодинаково. Поэтому целесообразно рассматривать свойства радиоволн по диапазонам, в пределах которых волны проявляют примерно одинаковые свойства. Принято в соответствии с Регламентом Радиосвязи разбивать весь радиодиапазон на отдельные диапазоны, руководствуясь десятичным принципом (табл.1.1.).

Мы рассмотрим вопросы, связанные с процессами свободного распространения радиоволн. Под свободным распространением радиоволн будем понимать распространение радиоволн в атмосфере, вдоль поверхности земли, в толще земли, в космическом пространстве. Из рассмотрения исключим случаи передачи электромагнитных волн по искусственным линиям связи — проводным линиям, волноводам, световодам, полосковым линиям передачи и т.п.

Свободно распространяющиеся радиоволны находят в современной науке и технике обширное и многообразное применение. Прежде всего, отметим использование радиоволн для передачи разного рода информации (телеграфия, телефония, телевидение, радиовещание), определения координат различных объектов (радиолокация, радионавигация), для управления на расстоянии различными устройствами и механизмами (радио- и телеуправление). Свободно распространяющиеся радиоволны широко используются в метеорологии при наблюдении за различными атмосферными образованиями (прогнозирование погоды), в геофизике, при изучении верхних слоев атмосферы, в радиоастрономии, при изучении строения планет, звезд, туманностей, находящихся как в пределах нашей галактики, так и вне ее.

Таблица 1.1. Диапазоны радиочастот и длин радиоволн

Обозн-е МСЭ*	Длины волн	Название волн	Диапазон частот	Название частот	Применение
ELF	100 Мм — 10 Мм	Декамегаметровые	3—30 Гц	Крайне низкие (КНЧ)	Связь с подводными лодками, геофизические исследования
SLF	10 Мм — 1 Мм	Мегаметровые	30—300 Гц	Сверхнизкие (СНЧ)	Связь с подводными лодками, геофизические исследования
ULF	1000 км — 100 км	Гектокилометровые	300—3000 Гц	Инфранизкие (ИНЧ)	Связь с подводными лодками
VLF	100 км — 10 км	Мириаметровые	3—30 кГц	Очень низкие (ОНЧ)	Связь с подводными лодками
LF	10 км — 1 км	Километровые	30—300 кГц	Низкие (НЧ)	Радиовещание, радиосвязь
MF	1000 м — 100 м	Гектометровые	300—3000 кГц	Средние (СЧ)	Радиовещание, радиосвязь
HF	100 м — 10 м	Декаметровые	3—30 МГц	Высокие (ВЧ)	Радиовещание, радиосвязь, рации
VHF	10 м — 1 м	Метровые волны	30—300 МГц	Очень высокие (ОВЧ)	Телевидение, радиовещание, радиосвязь, рации
UHF	1000 мм — 100 мм	Дециметровые	300—3000 МГц	Ультравысокие (УВЧ)	Телевидение, радиосвязь, Мобильные телефоны, рации, микроволновые печи, спутниковая навигация.
SHF	100 мм — 10 мм	Сантиметровые	3—30 ГГц	Сверхвысокие (СВЧ)	Радиолокация, интернет, спутниковое телевидение, радиосвязь, Беспроводные компьютерные сети.
EHF	10 мм — 1 мм	Миллиметровые	30—300 ГГц	Крайне высокие (КВЧ)	Радиоастрономия, высокоскоростная радиорелейная связь, метеорологические радиолокаторы, медицина
THF	1 мм — 0,1 мм	Децимиллиметровые	300—3000 ГГц	Гипервысокие частоты, длинноволновая область инфракрасного излучения	Экспериментальная «терагерцовая камера», регистрирующая изображение в длинноволновом ИК (которое излучается тепловыми организмами, но, в отличие от более коротковолнового ИК, не задерживается диэлектрическими материалами).

\* **МСЭ** – **международный союз электросвязи** (*International Telecommunication Union, ITU*) — международная организация, определяющая рекомендации в области телекоммуникаций и радио, а также регулирующая вопросы международного использования радиочастот (распределение радиочастот по назначениям и по странам). Основан как Международный телеграфный союз в 1865 году, с 1947 года является специализированным учреждением ООН. В МСЭ входит 193 страны и более 700 членов по секторам и ассоциациям (научно-промышленных предприятий, государственных и частных операторов связи, радиовещательных компаний, региональных и международных организаций).

Во всех перечисленных применениях общим является наличие передающего устройства, среды, в которой распространяются радиоволны, и приемного устройства. Все вместе эти элементы образуют радиолинию (рис. 1.3).

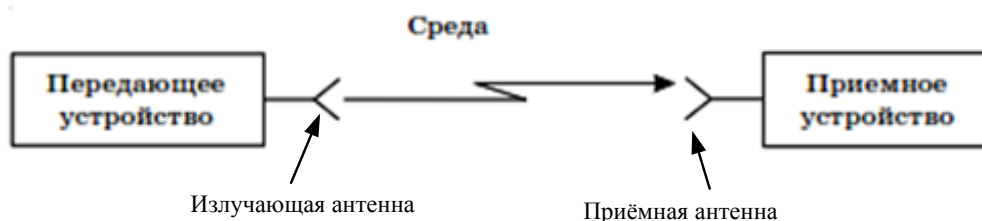


Рис. 1.3. Схематичное изображение радиолинии

В радиолиниях связующим элементом является природная среда, окружающая земной шар, например, атмосфера и космическое пространство, если радиолиния расположена между Землей и космическим аппаратом. На земных радиолиниях, типа земля-земля, среда включает в себя атмосферу и поверхность Земли. Земная атмосфера и поверхность Земли являются поглощающими, электрически неоднородными средами. При этом поглощение радиоволн зависит от частоты распространяющихся волн.

В последние годы для радиосвязи находят применение и волны оптического диапазона. Их разделяют на *инфракрасные* (частоты  $3 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$  Гц, длины волн  $10^{-3} - 7,5 \cdot 10^{-7}$  м), *видимые* (частоты  $4 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$  Гц, длины волн  $7,5 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$  м), *ультрафиолетовые* (частоты  $7,5 \cdot 10^{14} - 1,5 \cdot 10^{17}$  Гц, длины волн  $4 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-9}$  м).

Диапазон радиоволн ограничен и представляет собой ресурс, который, как и другие природные ресурсы, требует рационального использования.

## 1.2 Распространение радиоволн в свободном пространстве

Основной задачей дисциплины «Распространение радиоволн» является *определение мощности сигнала и напряженности электрического поля в точке приема* при заданных мощности передатчика, частоте излучаемого радиосигнала и параметрах трассы (расстоянии, высотах антенн и т.п.). Решение этой задачи обычно представляют в виде формулы для свободного пространства и множителя ослабления, учитывающего влияние реальных факторов.

Рассмотрим простейший случай распространения радиоволн в свободном пространстве без поглощения. Допустим, что источником радиоволн является *изотропный излучатель*, т.е. воображаемый точечный излучатель, равномерно излучающий радиоволны во всех направлениях.

Обозначая через  $P$  излучаемую источником мощность, определим *плотность потока энергии (вектор Пойнтинга)* на расстоянии  $r$  от источника радиоволн (рис. 1.4), основываясь на том, что излучаемая энергия равномерно распределяется по поверхности сферы радиуса  $r$ . Выражая мощность излучателя в ватах, а линейные размеры в метрах, получим для численного значения вектора Пойнтинга выражение

$$\Pi = \frac{P}{2\pi r^2} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right], \quad (1.2)$$

где  $2\pi r^2$  - площадь поверхности сферы, проходящей через точку наблюдения и с центром в точке расположения антенны. Плотность потока мощности показывает, какая мощность приходится на единицу площади фронта радиоволны.

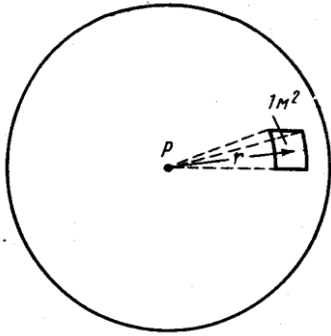


Рис. 1.4. К определению мощности принимаемого сигнала, создаваемого изотропным излучателем

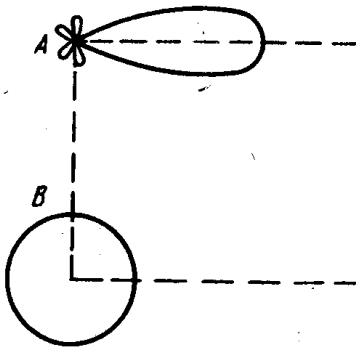


Рис. 1.5. Диаграммы направленности направленной (A) и изотропной (B) антенн

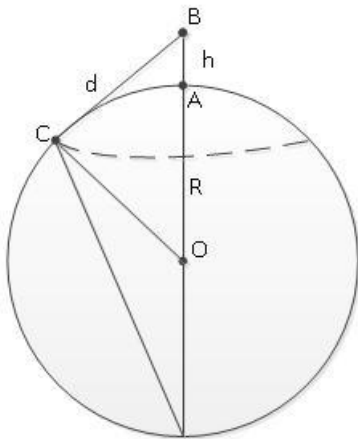


Рис. 1.6. К определению видимого горизонта

В реальной жизни на стороне человека выступает атмосфера. Она, благодаря явление **рефракции**, то есть преломлению лучей в атмосфере, увеличивает дальность видимого горизонта примерно на 6%.

Реальная антенна излучает ту же мощность по разным направлениям неравномерно (см. рис. 1.5). За счет этого в направлении максимального излучения вектор Пойнтинга увеличится в  $D$  раз:

$$\Pi = \frac{PG}{2\pi r^2}. \quad (1.3)$$

Параметр  $G$  называется **коэффициентом направленного действия антенны** (КНД) и является одним из ее основных параметров. Для **изотропной (ненаправленной) антенны коэффициент направленного действия  $G$  равен единице**.

Мощность принимаемого сигнала на выходе приёмной антенны будет зависеть от площади приёмной антенны и определяется выражением:

$$P_{\text{пр}} = \Pi S_A = \frac{PGS_A}{2\pi r^2}, \quad (1.4)$$

где  $S_A = \frac{G_{\text{пр}} \lambda^2}{4\pi}$  – эффективная площадь приёмной антенны,  $\text{м}^2$ ;  $G_{\text{пр}}$  – коэффициент направленного действия приёмной антенны;  $\lambda$  – длина волны радиосигнала, м.

Из формулы (1.4) видно, что принимаемая мощность обратно пропорциональна квадрату расстояния между источником и приёмником.

### 1.3 Дальность прямой видимости

**Видимый горизонт.** Так как Земля имеет форму шара, наблюдателю, находящемуся, например, в море, представляется, что он находится в центре круга, по краям которого небо как бы смыкается с морской поверхностью. Эта окружность и называется видимым горизонтом наблюдателя. На рис. 1.6 видимый горизонт обозначен штриховой линией. То есть для наблюдателя, находящегося в точке  $A$  на высоте  $h$  от поверхности земли, видимый горизонт будет образован всеми точками касания лучей зрения земной поверхности (угол  $\text{BCO}$  равен 90 градусов).

Говоря о видимом горизонте, чаще всего имеют в виду длину  $d$  отрезка  $\text{BC}$ . Длину  $d$  легко вывести из теоремы Пифагора (студентам предлагается проделать это самостоятельно).  $R$  – **радиус Земли**, который обычно принимают за **6 378 километров**.

**Дальность прямой видимости  $D$**  предметов определяется наибольшим расстоянием, на котором наблюдатель увидит вершину наблюдаемого объекта на линии горизонта. Как видно из рис. 1.7, она зависит как от высоты наблюдателя  $h$ , так и от высоты наблюдаемого объекта  $H$ . Собственно, это сумма дальности видимого горизонта наблюдателя и дальности видимого горизонта наблюдаемого объекта.

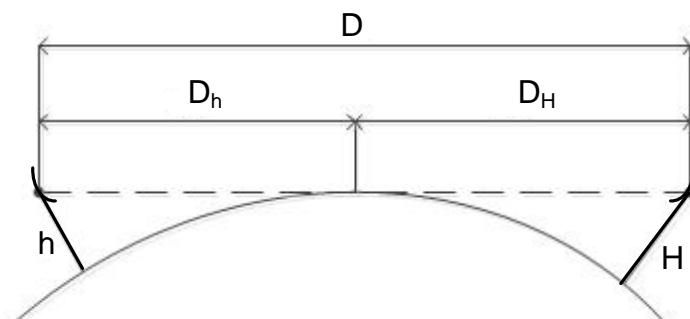


Рис. 1.7. К определению дальности прямой видимости

#### 1.4 Задание на лабораторную работу

Работа выполняется в программе MathCAD с использованием стандартных функций. В ходе выполнения лабораторной работы необходимо сделать следующее.

1. Определить дальность прямой видимости  $D$  между источником радиосигнала и приёмником с учётом увеличения этой дальности за счёт рефракции. Значения высот антенн источника ( $h$ ) и приёмника ( $H$ ) заданы в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Значения высот передающей и приёмной антенн.

Номер варианта	$h$ , м	$H$ , м	Номер варианта	$h$ , м	$H$ , м
1	3	10	13	16	3
2	1	9	14	18	8
3	3,5	8	15	25	6
4	2,5	7	16	4	4
5	5	6	17	7	1
6	10	5	18	10	10
7	15	4	19	19	7
8	1,2	12	20	12	3
9	3,5	5	21	5,5	5
10	4	3,5	22	4	9
11	3	4	23	9	1
12	23	5	24	11	2

2. Построить график зависимости принимаемой мощности от расстояния  $P_{пр}(r)$  при использовании изотропных (ненаправленных) антенн на передатчике и приёмнике. Максимальное значение дальности  $r_{max}$  должно равняться значению дальности прямой видимости  $D$ . Необходимые параметры для расчёта представлены в таблице 1.3. Для наглядности полученных результатов по оси ординат необходимо использовать логарифмическую шкалу.



Таблица 1.3. Значения частоты радиосигнала и излучаемой мощности.

Номер варианта	$f$ , МГц	$P$ , Вт	Номер варианта	$f$ , МГц	$P$ , Вт
1	600	100	13	500	85
2	750	80	14	800	94
3	980	50	15	925	56
4	620	95	16	475	97
5	1000	82	17	680	74
6	550	55	18	760	75
7	425	98	19	650	83
8	850	60	20	820	58
9	710	62	21	940	70
10	830	84	22	580	52
11	990	96	23	900	81
12	1050	56	24	640	93

3. Построить график зависимости принимаемой мощности от расстояния  $P_{пр}(r)$  при использовании направленных антенн на передатчике и приёмнике. Значения КНД обеих антенн приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4. Значения КНД передающей и приёмной антенн.

Номер варианта	$G$	$G_{пр}$	Номер варианта	$G$	$G_{пр}$
1	5	3	13	10	4
2	3	10	14	3	3
3	4	9	15	6	7
4	6	8	16	5	9
5	8	7	17	4	10
6	7	6	18	8	3
7	10	4	19	7	4
8	9	5	20	6	8
9	5	7	21	3	9
10	8	7	22	9	10
11	4	8	23	4	8
12	9	6	24	7	5

4. По полученным результатам сделать выводы и написать отчёт.

### 1.5 Рекомендации по выполнению лабораторной работы

Для получения корректных результатов необходимо размерности всех величин привести к системе единиц СИ.

При выполнении лабораторной работы следует руководствоваться полученными ранее знаниями и навыками работы с программой MathCAD.

### 1.6 Содержание отчёта

Отчёт оформляется в соответствии с образовательным стандартом ТУСУР и содержит следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) краткое изложение задания своими словами;

- 4) основная часть (полученные результаты с подробным описанием);
- 5) ответы на все контрольные вопросы;
- 6) выводы.

Требования к оформлению графиков:

- 1) все графики должны быть чёткими и наглядными;
- 2) каждый график должен иметь подпись, поясняющая это график;
- 3) оси на графиках должны быть подписаны, на осях указана размерность;
- 4) на графиках должна быть изображена сетка.

### **1.7 Контрольные вопросы**

1. Что такое изотропный источник излучения?
2. Как изменится дальность прямой видимости при увеличении высоты приёмной антенны?
3. Как изменится мощность принимаемого сигнала, если эффективную площадь приёмной антенны увеличить в два раза?

## **2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

### **МОЩНОСТЬ ПРИНИМАЕМОГО СИГНАЛА.**

#### **Часть 2**

**Цель работы:** изучение некоторых понятий теории распространения радиоволн и изучение факторов, влияющих на мощность принимаемого сигнала.

#### **2.1 Задание на лабораторную работу**

1. Выполнить Лабораторную работу 1 в программе MATLAB.
2. Написать отчет, в котором привести основные различия, встретившиеся при выполнении работы в двух программах.

#### **2.2 Рекомендации по выполнению лабораторной работы**

При выполнении лабораторной работы следует руководствоваться полученными ранее знаниями и навыками.

#### **2.3 Содержание отчёта**

Отчёт оформляется в соответствии с образовательным стандартом ТУСУР и содержит следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) *краткое* изложение задания *своими словами*;
- 4) основная часть (полученные результаты с подробным описанием);
- 6) выводы.

Требования к оформлению графиков:

- 5) все графики должны быть чёткими и наглядными;
- 6) каждый график должен иметь подпись, поясняющая это график;
- 7) оси на графиках должны быть подписаны, на осях указана размерность;
- 8) на графиках должна быть изображена сетка.

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

#### ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЛИНИИ СВЯЗИ

**Цель работы:** изучение способов оценки дальности действия линии связи и рассмотрение факторов, влияющих на значение дальности действия.

##### 3.1 Дальность действия линии связи в свободном пространстве

Дальность действия является одной из важнейших характеристик радиосистем различного назначения. *Под дальностью действия понимают* максимальное расстояние  $R = R_{\max}$ , при котором радиосистема выполняет свои функции с заданными характеристиками качества.

Для любых линий связи максимальная дальность определяется минимальным сигналом на входе приёмника, при котором удовлетворяются технические требования к системе связи. Минимально необходимая мощность сигнала  $P_{\text{пр min}}$  на входе приёмника зависит от мощности собственного шума приёмника  $P_{\text{ш}}$  и необходимого превышения  $k_p$  сигнала над ним:

$$P_{\text{пр min}} = k_p P_{\text{ш}}. \quad (3.1)$$

Величина  $k_p$  называется *коэффициент различимости* и показывает во сколько раз минимальная мощность сигнала на входе приёмника должна превышать мощность собственных шумов приёмника.

Мощность собственных шумов приёмника определяется коэффициентом шума  $k_{\text{ш}}$  приёмника, температурой  $T$  приёмника (К) и полосой пропускания  $\Delta f$  приёмника (Гц):

$$P_{\text{ш}} = k_{\text{ш}} k T \Delta f, \quad (3.2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Для того, чтобы определить максимальную дальность действия линии связи, необходимо составить уравнение

$$P_{\text{пр}}(R_{\max}) = P_{\text{пр min}} \quad (3.3)$$

и решить его относительно  $R_{\max}$ .

##### 3.2 Задание на лабораторную работу

Работа выполняется в программной среде MATLAB.

1. Решить уравнение (3.3) относительно  $R_{\max}$  и получить формулу для расчёта максимальной дальности действия линии связи.

2. Рассчитать мощность собственных шумов приёмника, если  $k_{\text{ш}} = 5$ ,  $T = 27$  °С,  $\Delta f = 30$  МГц.

3. Определить значение максимальной дальности при использовании ненаправленных (изотропных) антенн на передатчике и приёмнике. Значения высот антенн взять из таблицы 1.2. Значения частоты сигнала и излучаемой мощности взять из таблицы 1.3. Коэффициент различимости  $k_p$  принять равным 20.

4. Определить значение максимальной дальности по графику при тех же условиях. Для этого необходимо построить график зависимости принимаемой мощности от длины линии связи  $P_{\text{пр}} = f(r)$  и по пересечению с прямой линией  $P_{\text{пр min}} = \text{const}$  определить значение  $R_{\max}$ . Сравнить полученное значение  $R_{\max}$  со значением, полученным в п.3.

5. Повторить пункты 3 и 4 для случая, когда КНД *излучающей* антенны равен 4.
6. По полученным результатам сделать выводы и написать отчёт.

### 3.3 Рекомендации по выполнению лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы следует руководствоваться полученными ранее знаниями и навыками.

Для получения корректных результатов необходимо размерности всех величин привести к системе единиц СИ.

### 3.4 Содержание отчёта

Отчёт оформляется в соответствии с образовательным стандартом ТУСУР и содержит следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) *краткое* изложение задания *своими словами*;
- 4) основная часть (полученные результаты с подробным описанием);
- 5) ответы на все контрольные вопросы;
- 6) выводы.

Требования к оформлению графиков:

- 1) все графики должны быть чёткими и наглядными;
- 2) каждый график должен иметь подпись, поясняющая это график;
- 3) оси на графиках должны быть подписаны, на осях указана размерность;
- 4) на графиках должна быть изображена сетка.

### 3.5 Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент различимости?
2. Как изменится максимальная дальность действия линии связи, если излучаемую мощность приёмника уменьшить в четыре раза?
3. Каким образом можно увеличить дальность действия линии связи в два раза? Перечислите все возможные способы увеличения дальности действия.

## 4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЁННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ

**Цель работы:** изучение закона распределения напряжённости электрического поля в пространстве (вдоль и поперёк трассы распространения радиосигнала).

#### 4.1 Напряжённость электрического поля в свободном пространстве

Как было сказано выше, электромагнитная волна представляет собой совокупность электрического и магнитного синусоидальных колебаний в пространстве. Таким образом, *мгновенное значение напряжённости электрического поля в свободном пространстве* (без учёта влияния земли и других объектов) можно описать следующим выражением:

$$E_{cs}(r, t) = E_{m\ cs}(r) \cos(\omega t + kr). \quad (4.1)$$

**Мгновенное значение**  $E_{ce}(r, t)$  – величина напряжённости электрического поля, измеренная относительно нуля в любой выбранный момент времени  $t$ . Последовательность всех мгновенных значений в любом интервале времени можно рассмотреть как функцию изменения напряжённости во времени.

В формуле (4.1)  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота радиоволны, рад/с;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновой множитель, м<sup>-1</sup>;  $E_m(r)$  – амплитудное значение напряжённости поля.

**Амплитудное значение** – максимальное по модулю мгновенное значение за период. Часто вместо амплитудного значения применяется термин **амплитуда** – максимальное отклонение от нулевого значения.

Амплитудное значение напряжённости радиоволны в свободном пространстве зависит от излучаемой мощности сигнала и КНД излучающей антенны:

$$E_{m\ ce}(r) = \frac{\sqrt{60PG}}{r}. \quad (4.2)$$

Из выражения (4.2) видно, что амплитуда напряжённости радиоволны в свободном пространстве убывает обратно пропорционально расстоянию между источником этой радиоволны и приёмником, т.е. наблюдается затухание радиоволны.

Далее, опустим зависимость от времени, т.е. будем рассматривать только распределение напряжённости в пространстве.

#### 4.2 Влияние земли на амплитуду напряжённости поля

При распространении радиоволны вдоль поверхности земли в точку приёма будет приходиться две волны: прямая  $E_{прям}$  и отражённая  $E_{отр}$  от поверхности земли (см. рис. 4.1). Таким образом, результирующее значение **амплитуды напряжённости** радиоволны в точке приёма будет определяться суммой этих двух волн:

$$E(r) = E_{прям}(r) + E_{отр}(r). \quad (4.3)$$

Формулу (4.3) обычно записывают в другом виде:

$$E(r) = E_{прям}(r) \cdot V(r), \quad (4.4)$$

где  $E_{прям}(r) = E_m(r)$  соответствует амплитуде прямой волны, распространяющейся в свободном пространстве;  $V(r)$  – множитель ослабления радиоволны, учитывающий влияние отражённой волны.

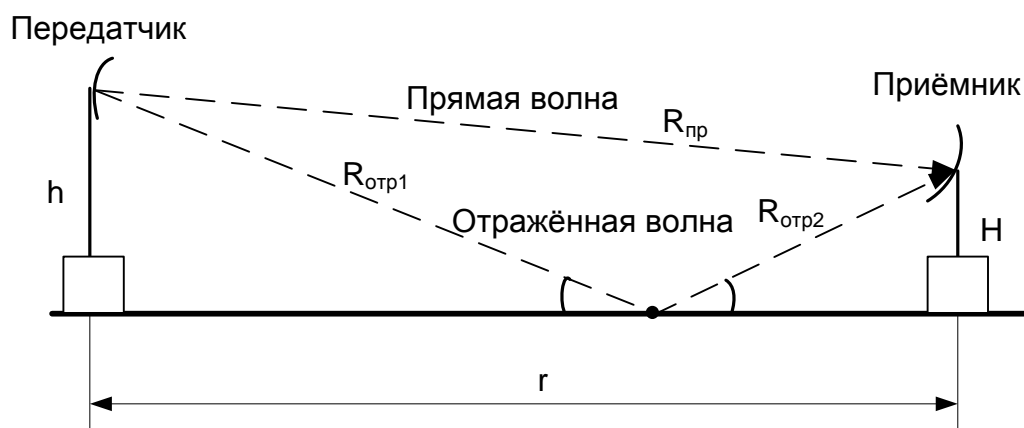


Рис. 4.1. Влияние отражённых от земли волн на результирующий сигнал в точке приёма

Множитель ослабления зависит от разности длин путей, которые прошли прямая и отражённая волны:

$$V(r) = 2 \left| \sin \left( \frac{\pi}{\lambda} \Delta R + \varphi_{\text{отр}} \right) \right|, \quad (4.5)$$

где  $\Delta R = (R_{\text{отр1}} + R_{\text{отр2}}) - R_{\text{пр}}$  – разность хода отражённого и прямого лучей, м;  $\varphi_{\text{отр}}$  – изменение фазы радиоволны при отражении.

Из формулы (4.5) видно, что значение множителя ослабления изменяется от 0 до 2. Если множитель ослабления равен 0, то в этом случае отражённая и прямая волны приходят в противофазе и компенсируют друг друга. Следовательно, напряжённость поля в данной точке будет равна нулю. Если множитель ослабления равен 2, то в данной точке пространства прямая и отражённая волны складываются синфазно и наблюдается усиление принимаемого сигнала по сравнению с распространением в свободном пространстве. Таким образом, влияние земли проявляется в появлении чередующихся в пространстве (вдоль и поперёк трассы распространения) максимумов и минимумов амплитуды напряжённости радиоволны.

### 4.3 Задание на лабораторную работу

1. Построить график зависимости мгновенного значения напряжённости радиоволны в свободном пространстве  $E_{\text{св}}(r, 0)$  от расстояния между передатчиком и приёмником. На этом же графике построить зависимость амплитуды напряжённости радиоволны от расстояния.

Исходные данные для расчёта: КНД антенны передатчика равен 5; мощность излучения  $P = 10 + N$  Вт, где  $N$  – номер варианта; длина радиоволны 1 м; диапазон изменения расстояния  $r \in (1 \dots 100)$  м; шаг изменения расстояния 0,01 м.

2. Построить график зависимости множителя ослабления  $V$  от расстояния  $r$ . Значения высот антенн взять из таблицы 1.2. Изменение фазы радиоволны при отражении  $\varphi_{\text{отр}}$  принять равным  $\pi$ .

Для определения длины путей прямого и отражённого лучей рекомендуется воспользоваться рис. 4.2.

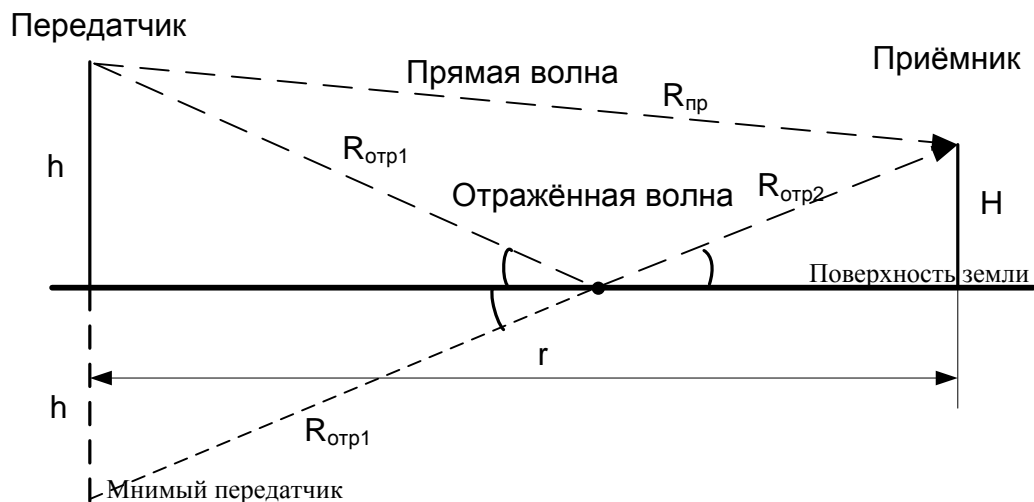


Рис. 4.2. К определению разности хода прямого и отражённого лучей

3. Построить график зависимости множителя ослабления  $V$  от высоты антенны приёмника  $H$ .

Исходные данные для расчёта: КНД антенны передатчика равен 5; мощность излучения  $P = 10 + N$  Вт, где  $N$  – номер варианта; длина радиоволны 1 м; расстояние между передатчиком и приёмником  $r = 100$  м; диапазон изменения высоты  $H \in (0 \dots 100)$  м; шаг изменения высоты 0,01 м.

4. Построить двумерный график – зависимость множителя ослабления от высоты и дальности  $V = f(r, H)$ . Диапазон изменения расстояния  $r \in (1 \dots 1000)$  м; шаг изменения расстояния 0,1 м; диапазон изменения высоты  $H \in (0 \dots 100)$  м; шаг изменения высоты 0,1 м.

5. По полученным результатам сделать выводы и написать отчёт.

#### 4.4 Рекомендации по выполнению лабораторной работы

Для правильного выполнения пунктов 2 – 4 необходимо вначале решить геометрическую задачу по нахождению разности хода отражённого и прямого лучей  $\Delta R$ . В этом случае рекомендуется воспользоваться рис. 4.2.

При выполнении лабораторной работы следует руководствоваться полученными ранее знаниями и навыками.

#### 4.5 Содержание отчёта

Отчёт оформляется в соответствии с образовательным стандартом ТУСУР и содержит следующие элементы:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) *краткое* изложение задания *своими словами*;
- 4) основная часть (полученные результаты с подробным описанием);
- 5) ответы на все контрольные вопросы;
- 6) выводы.

Требования к оформлению графиков:

- 1) все графики должны быть чёткими и наглядными;
- 2) каждый график должен иметь подпись, поясняющая это график;
- 3) оси на графиках должны быть подписаны, на осях указана размерность;
- 4) на графиках должна быть изображена сетка.

#### 4.6 Контрольные вопросы

1. Как зависит от расстояния амплитуда напряжённости радиоволны в свободном пространстве?
2. Что такое множитель ослабления?
3. Почему на некоторых участках трассы наблюдается усиление принимаемого сигнала?

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М: Связь, 1972. – 335 с.
2. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. – ЛЕНАНД, 2009. – 496 с. -  
[http://www.vixri.com/d/Jakovlev%20O.I.%20%20\\_Rasprostranenie%20radiovoln,%202010,%20489s.pdf](http://www.vixri.com/d/Jakovlev%20O.I.%20%20_Rasprostranenie%20radiovoln,%202010,%20489s.pdf)
3. Образовательный стандарт ТУСУР 01-2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. Томск: ТУСУР, 2013. – 57 с.  
[http://www.rts.tusur.ru/wp-content/uploads/2013/12/tech\\_01-2013.pdf](http://www.rts.tusur.ru/wp-content/uploads/2013/12/tech_01-2013.pdf)