

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
(СибГУТИ)

Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)



## ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### ПО ДИСЦИПЛИНЕ

### Б1.В.02 Антенны и распространение радиоволн


Направление подготовки / специальность: **11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»**

Направленность (профиль) / специализация: **Инфокоммуникационные технологии в услугах связи**

Форма обучения: **очная**

Год набора: **2023**

Разработчик (-и):  
доцент

  
\_\_\_\_\_ / С.А. Баранов /  
подпись

Оценочные средства обсуждены и утверждены на заседании инфокоммуникационных технологий и мобильной связи (ИТиМС)

Протокол от 25.05.2023 г. № 9

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ / Н.В. Будылдина /  
подпись

Екатеринбург, 2023

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»  
(СибГУТИ)  
Уральский технический институт связи и информатики (филиал) в г. Екатеринбурге  
(УрТИСИ СибГУТИ)

УТВЕРЖДАЮ  
директор УрТИСИ СибГУТИ  
\_\_\_\_\_ Минина Е.А.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

## ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

### ПО ДИСЦИПЛИНЕ

#### **Б1.В.02 Антенны и распространение радиоволн**

Направление подготовки / специальность: **11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»**

Направленность (профиль) / специализация: **Инфокоммуникационные технологии в услугах связи**

Форма обучения: **очная**

Год набора: 2023

Разработчик (-и):  
доцент

\_\_\_\_\_ / С.А. Баранов /  
подпись

Оценочные средства обсуждены и утверждены на заседании инфокоммуникационных технологий и мобильной связи (ИТиМС)

Протокол от 25.05.2023 г. № 9

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ / Н.В. Будылдина /  
подпись

Екатеринбург, 2023

## 1. Перечень компетенций и индикаторов их достижения

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенций	Этап	Предшествующие этапы (с указанием дисциплин/практик)
ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи	ПК-1.1 Знает теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей	3	
ПК-3 Способен к выявлению, локализации и устранению неисправности на оборудовании связи, восстановлению схемы организации связи	ПК-3.2 Знает принципы действия, конструкции и параметры компонентов и устройств телекоммуникационных систем ПК-3.3 Умеет локализовать неисправности станционного оборудования, восстанавливать основную схему организации связи	3	

Форма промежуточной аттестации по дисциплине – экзамен

## 2. Показатели, критерии и шкалы оценивания компетенций

2.1. Показателем оценивания компетенций на этапе их формирования при изучении дисциплины является уровень их освоения.

Индикатор освоения компетенции	Показатель оценивания	Критерий оценивания
ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи	Знает: – Знает теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей Умеет: – проводить сравнительный анализ свойств и характеристик материалов и элементов телекоммуникационных систем для эксплуатации и развития сетевых платформ, систем и сетей передачи данных;	Демонстрирует уверенные знания теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей, методы исследования элементарных излучателей; функции антенн в составе радиоканале, первичные и вторичные характеристики антенн, работу антенн в режиме приема и передачи. – явления, возникающие на границе раздела сред Умеет применять основные расчетные формулы, для расчета параметров антенн, умеет пояснять их на экзамене; в отчетах по практическим работам и приведены основные расчетные формулы передаточных параметров,

	<p>– анализировать структуру электромагнитного поля в различных линиях передачи включая полые и диэлектрические волноводы, а также волоконно-оптические направляющие системы.</p> <p>Владеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– навыками разработки электрических принципиальных схем устройств связи;</li> <li>– навыками практической работы с современной измерительной аппаратурой.</li> </ul>	<p>при этом в расчетах отсутствуют ошибки.</p> <p>При защите лабораторных, практических работ формулирует выводы по полученным результатам.</p>
<p>ПК-3 Способен к выявлению, локализации и устранению неисправности на оборудовании связи, восстановлению схемы организации связи</p>	<p>Знает:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>принципы действия, конструкции и параметры компонентов и устройств телекоммуникационных систем);</li> <li>– новейшее оборудование и программное обеспечение;</li> <li>– общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетевых платформ;</li> <li>-функции антенн в составе радиоканале.</li> <li>первичные и вторичные характеристики антенн.</li> <li>-работу антенн в режиме прием и передачи.</li> </ul> <p>Умеет:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- собирать и анализировать данные о работе узлов сети;</li> <li>– рассчитывать параметры электрических цепей узлов сетей связи;</li> <li>– использовать нормативно-техническую документацию при разработке инструкции по эксплуатационно-техническому обслуживанию;</li> <li>– использовать современные информационно-</li> </ul>	<p>Демонстрирует уверенные знания теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей, методы исследования элементарных излучателей; функции антенн в составе радиоканале, первичные и вторичные характеристики антенн, работу антенн в режиме приема и передачи.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– явления, возникающие на границе раздела сред</li> </ul> <p>Умеет применять основные расчетные формулы, для расчета параметров антенн, умеет пояснять их на экзамене; в отчетах по практическим работам и приведены основные расчетные формулы передаточных параметров, при этом в расчетах отсутствуют ошибки.</p> <p>При защите лабораторных, практических работ формулирует выводы по полученным результатам</p>

	<p>коммуникационные технологии, в том числе специализированное программное обеспечение для решения задач проектирования и проведения расчетов;</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– осуществлять мониторинг и анализировать статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных;</li><li>– разрабатывать мероприятия по поддержанию системы на требуемом уровне</li></ul> <p>Владеет: – навыками разработки схемы организации связи и интеграции в нее новых элементов;</p> <ul style="list-style-type: none"><li>– навыками проведения регламентных работ</li></ul>	
--	--	--

### Шкала оценивания.

5-балльная шкала	Критерии оценки
Отлично	<p>1. Самостоятельно и правильно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. Уверенно, логично, последовательно и аргументировано излагает свой ответ. Может ответить на дополнительные вопросы.</p> <p>2. Самостоятельно и правильно решил задачу экзаменационного билета. Уверенно и логично объясняет ход решения.</p> <p>Студент усвоил основную литературу и знаком с дополнительной литературой, рекомендованной программой, свободно оперирует приобретенными знаниями, умениями, применяет их при выполнении заданий.</p>
Хорошо	<p>1. Самостоятельно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. Не уверенно отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы.</p> <p>2. Самостоятельно и правильно решил задачу экзаменационного билета. Уверенно и логично объясняет ход решения.</p> <p>Допущены ошибки при решении задач</p>
Удовлетворительно	<p>1. Самостоятельно ответил на поставленные теоретические вопросы экзаменационного билета. При этом допускает ошибки. Не уверенно или вообще не отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы.</p> <p>2. Решил задачу экзаменационного билета. При наличии ошибок, может исправить их за счет наводящих вопросов. Не уверенно объясняет ход решения задачи.</p>
Неудовлетворительно	<p>1. Не решена задача экзаменационного билета.</p> <p>2. Решена задача, но не даны ответы на теоретические вопросы экзаменационного билета.</p>

### 3. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания по дисциплине

#### 3.1. В ходе реализации дисциплины используются следующие формы и методы текущего контроля

Тема и/или раздел	Формы/методы текущего контроля успеваемости
<b>ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи</b> Знает: – Знает теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей Умеет: – проводить сравнительный анализ свойств и характеристик материалов и элементов телекоммуникационных систем для эксплуатации и развития сетевых платформ, систем и сетей передачи данных; – анализировать структуру электромагнитного поля в различных линиях передачи включая полые и диэлектрические волноводы, а также волоконно-оптические направляющие системы. Владеет: – навыками разработки электрических принципиальных схем устройств связи; – навыками практической работы с современной измерительной аппаратурой.	
Раздел 1 Введение	Экзамен
Раздел 2 Общие свойства электромагнитного поля	Экзамен
Раздел 3 Фидерные системы.	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 4 Плоские волны	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 5 Излучение электромагнитных волн.	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 6 Антенны	Экзамен Лабораторная работа
Раздел 7 Общие вопросы распространения радиоволн	Экзамен
Раздел 8 Атмосфера Земли и её влияние на распространение радиоволн	Экзамен Практическая работа
Раздел 9 Затухание радиоволн в канале распространения. Помехи.	Экзамен Лабораторная работа
Раздел 10 Заключение	Экзамен Практическая работа
<b>ПК-3 Способен к выявлению, локализации и устранению неисправности на оборудовании связи, восстановлению схемы организации связи</b> Знает: принципы действия, конструкции и параметры компонентов и устройств телекоммуникационных систем); – новейшее оборудование и программное обеспечение; – общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетевых платформ; -функции антенн в составе радиоканале. первичные и вторичные характеристики антенн.	

- работу антенн в режиме прием и передачи.  
 Умеет:

- собирать и анализировать данные о работе узлов сети;
- рассчитывать параметры электрических цепей узлов сетей связи;
- использовать нормативно-техническую документацию при разработке инструкции по эксплуатационно-техническому обслуживанию;
- использовать современные информационно-коммуникационные технологии, в том числе специализированное программное обеспечение для решения задач проектирования и проведения расчетов;
- осуществлять мониторинг и анализировать статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных;
- разрабатывать мероприятия по поддержанию системы на требуемом уровне

Владеет: – навыками разработки схемы организации связи и интеграции в нее новых элементов;  
 – навыками проведения регламентных работ

Раздел 1 Введение	Экзамен
Раздел 2 Общие свойства электромагнитного поля	Экзамен
Раздел 3 Фидерные системы.	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 4 Плоские волны	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 5 Излучение электромагнитных волн.	Экзамен Лабораторная работа Практическая работа
Раздел 6 Антенны	Экзамен Лабораторная работа
Раздел 7 Общие вопросы распространения радиоволн	Экзамен
Раздел 8 Атмосфера Земли и её влияние на распространение радиоволн	Экзамен Практическая работа
Раздел 9 Затухание радиоволн в канале распространения. Помехи.	Экзамен Лабораторная работа
Раздел 10 Заключение	Экзамен Практическая работа



### **3.2. Типовые материалы текущего контроля успеваемости обучающихся**

#### **ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи**

Знает:

– Знает теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей

Умеет:

– проводить сравнительный анализ свойств и характеристик материалов и элементов телекоммуникационных систем для эксплуатации и развития сетевых платформ, систем и сетей передачи данных;

– анализировать структуру электромагнитного поля в различных линиях передачи включая полые и диэлектрические волноводы, а также волоконно-оптические направляющие системы.

Владеет:

– навыками разработки электрических принципиальных схем устройств связи;

– навыками практической работы с современной измерительной аппаратурой.

#### **ПК-3 Способен к выявлению, локализации и устранению неисправности на оборудовании связи, восстановлению схемы организации связи**

Знает:

-принципы действия, конструкции и параметры компонентов и устройств телекоммуникационных систем);

– новейшее оборудование и программное обеспечение;

– общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетевых платформ;

-функции антенн в составе радиоканале.

первичные и вторичные характеристики антенн.

-работу антенн в режиме прием и передачи.

Умеет:

- собирать и анализировать данные о работе узлов сети;

– рассчитывать параметры электрических цепей узлов сетей связи;

– использовать нормативно-техническую документацию при разработке инструкции по эксплуатационно-техническому обслуживанию;

– использовать современные информационно-коммуникационные технологии, в том числе специализированное программное обеспечение для решения задач проектирования и проведения расчетов;

– осуществлять мониторинг и анализировать статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных;

– разрабатывать мероприятия по поддержанию системы на требуемом уровне

Владеет: – навыками разработки схемы организации связи и интеграции в нее новых элементов;

– навыками проведения регламентных работ

Практическая работа по теме «Расчет множителя затухания поля в области прямой видимости»

#### **1 Задание:**

1.1. Рассчитать амплитуду поля передатчика мощностью 1 кВт на дальности 30 км.

1.2. Определить плотность потока мощности базовой станции с передатчиком мощностью 200 Вт на расстоянии 15 км. Антенна базовой станции имеет коэффициент усиления 12 и запитана кабелем длиной 50 м с коэффициентом затухания 1 дБ/м

- 1.3. Рассчитать уровень сигнала на входе сотового телефона  $f=950$  МГц, если мощность передатчика базовой станции 100 Вт, коэффициент усиления 30, длина кабеля 40 м, коэффициент затухания 0,5 дБ/м. Коэффициент усиления антенны сотового телефона – 2,0
- 1.4. Определить дальность зоны приема для условия предыдущей задачи, если чувствительность приемника сотового телефона равна 15 мкВт.
- 1.5. Сравнить уровень сигнала для условия задачи 3 для каналов GSM-900 и GSM-1800.
- 1.6. Вычислить коэффициент основных потерь для одного пролета радиорелейной линии связи длиной 40 км. Частота канала 14,5 ГГц. Коэффициент усиления антенн – 43дБ.
- 1.7. Записать выражение для поля приемника в приближении плоской задачи, если  $P_{пер}=10$  Вт, дальность 10 км, высоты антенн 15 и 20 м,  $f=900$  МГц.
- 1.8. Для условия задачи 7 рассчитать модуль множителя ослабления если коэффициент отражения
- 1.9. Для условия задачи 7 найти границу области Введенского.
- 1.10. Построить зависимость  $V(r)$  при приближении плоской Земли для Екатеринбургского телецентра  $h_1=180$ м,  $h_2=20$ м,  $f=70$  МГц,
- 1.11. Определить границу области Введенского в приближении плоской поверхности и рассчитать в ней зависимость поля от дальности для передатчика «радио СК».  $h_1=2$ м,  $h_2=20$ м,  $f=100$ МГц,  $P_{пер}=2$  кВт
- 1.12. Рассчитать приведенные высоты антенн пролета РРЛ при  $h_1=100$ м,  $h_2=20$ м, в зависимости от  $r$ . Определить расстояние видимости
- 1.13. Определить границу области Введенского в приближении сферической Земли для условий задачи 11
- 1.14. Рассчитать коэффициент расходимости луча для радиолинии  $h_1=50$ м,  $h_2=30$ м,  $r=30$  км
- 1.15. Построить зависимость  $V(r)$  для условий задачи 10 при сферической поверхности Земли и с учетом расходимости луча.

## 2 Исходные данные:

В области прямой видимости возможны два механизма распространения радиоволн: прямой (свободно распространяющийся) волной и отраженной волной. Для антенн, располагающихся вблизи отражающих поверхностей (поверхность земли, элементы конструкций транспортных средств, зданий и т.д.), оба этих механизма реализуются одновременно и суммарное поле представляет интерференцию волн.

Распространение прямой волной в реальных условиях встречается очень редко (связь между самолетами на большой высоте или космическими станциями), но его исследование необходимо для выяснения затухания поля, связанного с его пространственной структурой. Это решение используется, помимо прочего, в качестве исходного при анализе других механизмов распространения.

Все антенны в дальней зоне излучают сферическую волну. Для изотропной (ненаправленной) антенны плотность потока мощности (модуль вектора Пойнтинга) на поверхности охватывающей сферы в дальней зоне определяется соотношением:  $|\dot{\vec{P}}| = P_{пер}/(4\pi R^2)$ , где  $P_{пер}$  – мощность излучаемая передающей антенной,  $R$ - радиус сферы. Модуль вектора Пойнтинга определяется и через амплитуду электрического поля по известному соотношению:  $|\dot{\vec{P}}| = \frac{1}{2} \cdot \frac{|\vec{E}|^2}{W}$ , где  $W=120\pi$  – характеристическое сопротивление свободного пространства. Сравнивая эти два соотношения получим:

$$|E| = \frac{\sqrt{60 \cdot P_{пер}}}{R} \left[ \frac{В}{М} \right], \quad (1)$$

где  $|E|$  - амплитуда поля на поверхности сферы.

В реальных радиолиниях используются направленные антенны, которые подключаются к приемнику и передатчику через фидерные тракты, имеющие потери (рисунок 3.1)

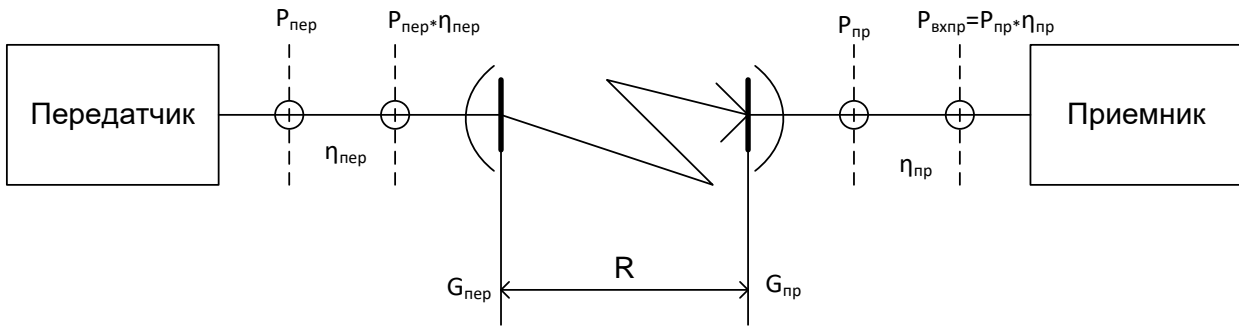


Рисунок 3.1 - Направленные антенны

На рисунке:  $P_{\text{пер}}$  и  $P_{\text{вхпр}}$  – мощность передатчика и на входе приемника;  $\eta_{\text{пер}}$ ,  $\eta_{\text{пр}}$  – коэффициенты полезного действия, передающего и приемного антенно-фидерных трактов;  $G_{\text{пер}}$ ,  $G_{\text{пр}}$  – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн, учитывающие их направленные свойства и потери.

Плотность потока мощности у приемной антенны, создаваемая передающей антенной определяется соотношением

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}}}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \right]. \quad (2)$$

Эта плотность потока возбуждает в приемной антенне мощность  $P_{\text{пр}} = P_{\text{пр}} S_{\text{эфф}}$ , где  $S_{\text{эфф}} = G_{\text{пр}} \cdot \lambda^2 / (4\pi)$  – эффективная площадь приемной антенны равная площади фронта волны, с которого антенна забирает мощность. Исходя из этого:

$$P_{\text{вхпр}} = \eta_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda^2}{(4 \cdot \pi \cdot R)^2} \text{ [Вт]} \quad (3)$$

Отношение мощности подводимой к передающей антенне к мощности на выходе приемной антенны называют потерями передачи. При распространении прямой волной они записываются в виде:

$$L_0 = \frac{P_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} = \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2 \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $L_0$  – коэффициент основных потерь в свободном пространстве.

В случае реальной среды потери, обусловленные ее свойствами, выражают через множитель ослабления –  $V$ . С учетом его коэффициент потерь передачи записывается в виде:

$$L = L_0 / V^2 \quad (5)$$

Расчет поля отраженной волны обычно осуществляют совместно с расчетом поля прямой волны и находят суммарное поле в точке приема для приподнятых антенн. В общем случае такая задача должна учитывать достаточно большое число факторов: диаграммы направленности и поляризационные характеристики передающей и приемной антенны, необходимость параметров отражающей поверхности в пределах эллипса существенного при отношении, форму отражающей поверхности и т.д. В качестве первого приближения обычно используют расчет поля при поднятых ненаправленных антенн в приближении плоской поверхности с однородными характеристиками отражения (рисунок 3.2)

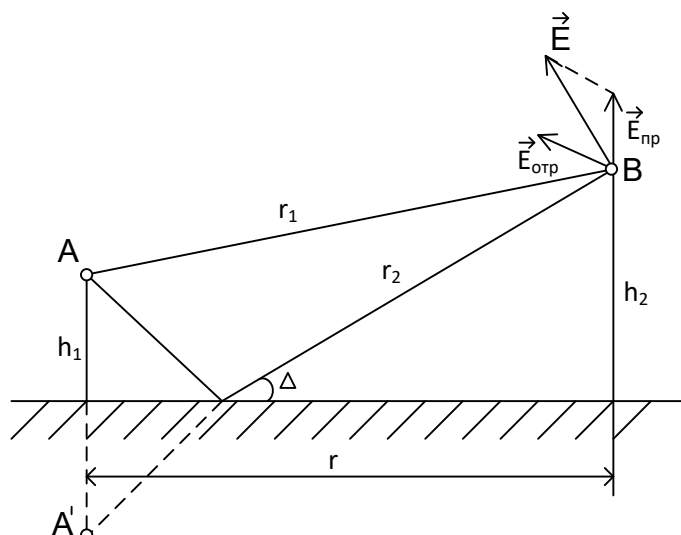


Рисунок 3.2 – Расчет поля при поднятых ненаправленных антенн в приближении плоской поверхности с однородными характеристиками отражения

Будем считать, что высоты подвеса антенн  $h_1$  и  $h_2$  существенно меньше расстояния между ними ( $h_1, h_2 \ll r$ ). Передающая антенна (точка А) и приемная антенна (точка В) находятся в дальней зоне одна у другой и являются ненаправленными или слабонаправленными. Коэффициенты отражения  $\dot{R}_{\parallel}^{(\Delta)} = R_{\parallel}^{(\Delta)} \cdot e^{-j\theta_{\parallel}(\Delta)}$  и  $\dot{R}_{\perp}^{(\Delta)} = R_{\perp}^{(\Delta)} \cdot e^{-j\theta_{\perp}(\Delta)}$  не меняются в пределах эллипса отражения (если плоскость отражения поверхность Земли, то говорят о коэффициентах отражения для вертикальной и горизонтальной поляризации  $\dot{R}_B(\Delta)$  и  $\dot{R}_r(\Delta)$ ).

Угол возвышения -  $\Delta$  при принятых условиях определяется из соотношения:

$$tg\Delta \approx \sin\Delta \approx (h_1 + h_2)/2 \quad (6)$$

Поле прямой волны в точке В записывается в виде:

$$\dot{E}_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{60P_{\text{неп}}}}{r_1} \cdot e^{-jkr_1} \quad (7)$$

где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  волновое число свободного пространства.

Поле отраженной волны, в свою очередь:

$$\dot{E}_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{60P_{\text{неп}}}}{r_2} \cdot e^{-jkr_2} \cdot e^{-j\theta} \quad (8)$$

Для случая, изображенного на рисунке 3.1,  $\dot{R} = \dot{R}_{\parallel}$  (или  $\dot{R}_B$ ).

Учитывая, что угол  $\Delta$  достаточно мал, векторы  $\vec{E}_{\text{пр}}$  и  $\vec{E}_{\text{отр}}$  можно считать параллельными и суммарное поле определяется алгебраическим суммированием:  $\dot{E} = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{отр}}$ . Отличим  $r_1$  и  $r_2$  в знаменателях формул (3.6) и (3.7) при  $r_1, r_2 \gg \lambda$  так же пренебрегаем. Проведя суммирование, получим:

$$\dot{E} = \frac{\sqrt{60P_{\text{неп}}}}{r} [1 + R \cdot e^{-j[k(r_2 - r_1) + \theta]}] e^{-jkr_1} \quad (9)$$

Величина, стоящая в квадратных скобках в выражении (3.9) является множителем ослабления для приподнятых антенн. Модуль множителя ослабления записывается в виде:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) + \theta \right]} \quad (10)$$

где  $\frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1)$  - называется разностью хода прямой и отраженной волн. Для случая  $r \gg h_1, h_2$  можно считать:  $r_2 - r_1 \approx \frac{2h_1 h_2}{r}$ .

Тогда получим:

$$V = \sqrt{1 + R^2 + 2R \cos \left[ \frac{4\pi h_1 h_2}{r\lambda} + \theta \right]} \quad (11)$$

Из выражения (3.11) следует, что при изменении  $h_1, h_2$  или  $r$  изменение амплитуды поля имеет немонотонный характер. При  $\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} + \theta = 2m\pi$ , где  $m=1, 2, 3$  и т.д. множитель ослабления максимален  $V_{\max}=1+R$ , а при  $\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} + \theta = (2n+1)\pi$ , где  $n=1, 2, 3$  и т.д. -  $V_{\min}=1-R$ .

На рисунке 3.3 показана зависимость  $V(r)$ . Ширина интерференционных лепестков уменьшаются при приближении к передатчику, так как разность хода обратно пропорциональна расстоянию. Одновременно при приближении к источнику значение  $R$  уменьшается, а  $\Delta$  растет, поэтому разница между максимумами и минимумами поля уменьшается.

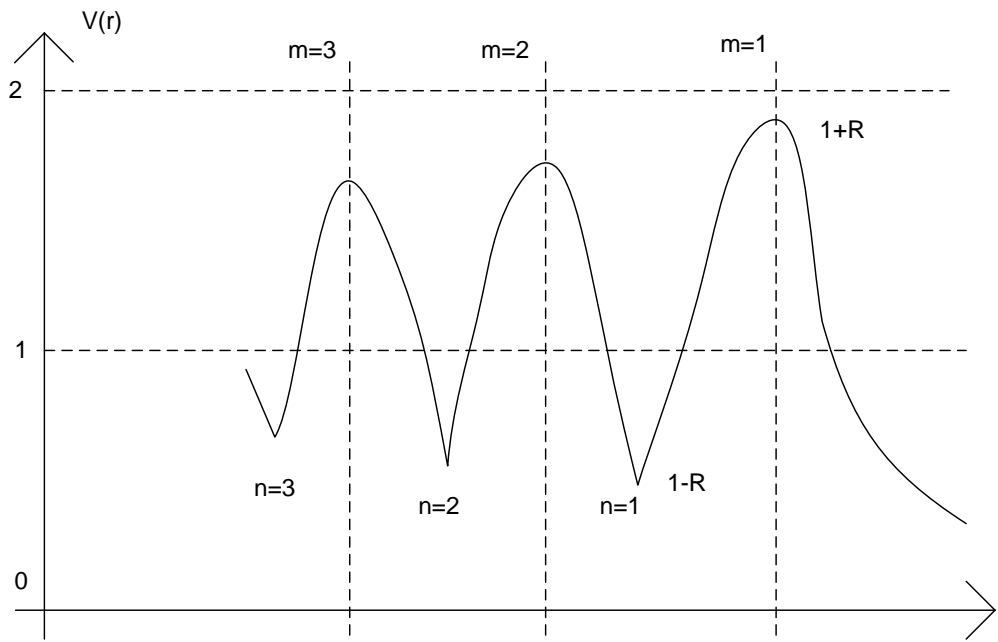


Рисунок 3.3 – Зависимость  $V(r)$

Максимум с  $m=1$  находится на наибольшем удалении. При дальнейшем росте  $r$  траектория волн сливаются, разность хода стремится к нулю и множитель ослабления монотонно убывает. Поле в этом случае можно вычислить по формуле Введенского:

$$\dot{E} = \frac{\sqrt{60P_{\text{пер}}}}{r^2} \cdot \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda} \left[ \frac{\text{В}}{\text{М}} \right] \quad (12)$$

Для сферической отражающей поверхности (поверхность Земли) множитель ослабления для приподнятых антенн вычисляется по тем же формулам, но с использованием приведенных высот антенн.

Определение приведенных высот  $h'_1$  и  $h'_2$  понятно на рисунке 3.4. Они приблизительно определяются соотношениями:

$$h'_1 = h_1 - \frac{r^2}{2R_{\text{зем}}} \cdot \left( \frac{h_1}{h_1 + h_2} \right)^2 \quad (13)$$

$$h'_2 = h_2 - \frac{r^2}{2R_{\text{зем}}} \cdot \left( \frac{h_2}{h_1 + h_2} \right)^2 \quad (14)$$

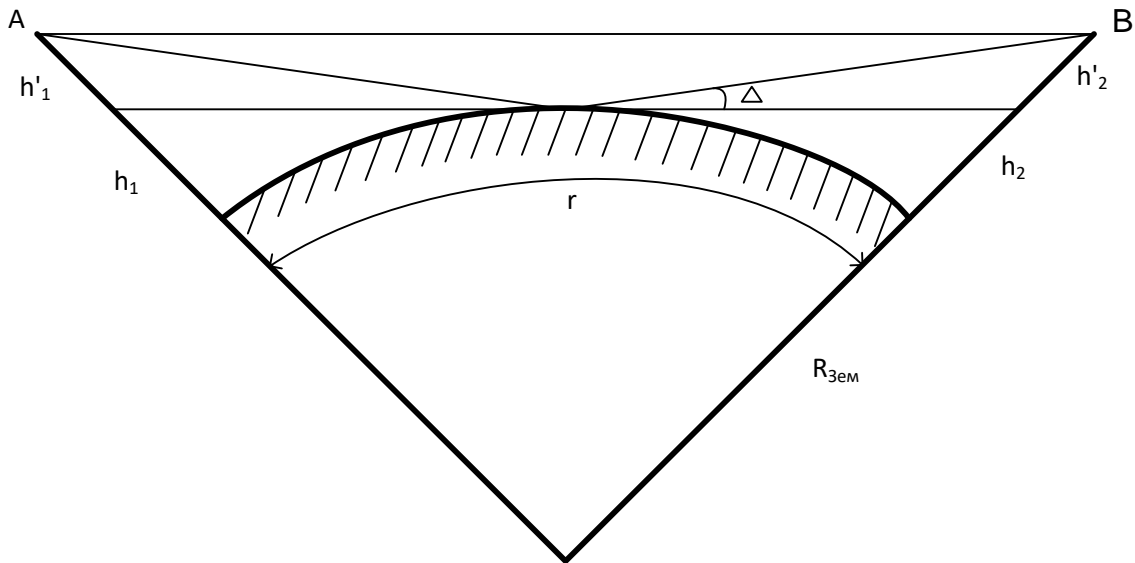


Рисунок 3.4 – Определение приведенных высот  $h'_1$  и  $h'_2$

Остальные параметры определяются следующим образом:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \frac{2h'_1 h'_2}{r} \text{ и } \text{tg} \Delta = \sin \Delta = \frac{h'_1 + h'_2}{r} \quad (15)$$

При отражении от сферической поверхности происходит расширение луча, по сравнению с отражением от плоскости. Это учитывается через коэффициент расходимости:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2r^2 h'_1 h'_2}{R_{\text{зем}} (h'_1 + h'_2)^3}}} \quad (16)$$

В формулах (3.10), (3.11), при этом необходимо вместо модуля коэффициента отражения – R подставлять произведение D·R.

Лабораторная работа по теме «Исследование и сравнение параметров волн в коаксиальной и волноводной линиях передачи»

### 1. Цель работы:

- 1.1 Получение базовых навыков работы с СВЧ генератором и измерительным оборудованием.
- 1.2 Исследование структуры поля в прямоугольном волноводе
- 1.3 Исследование структуры поля в коаксиальном кабеле.

### 2 Литература:

1. Баранов С.А. Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие – М. Горячая линия – Телеком, 2018, 344с.
2. Основы теории антенн и распространения радиоволн: учебное пособие / В. П. Кубанов, В. А. Ружников, М. Ю. Сподобаев, Ю. М. Сподобаев ; под редакцией В. П. Кубанов. — Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2016. — 257 с.
3. Буянов, Ю. И. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства : учебное пособие / Ю. И. Буянов, Г. Г. Гошин. — Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2013. — 300 с.

### 3. Порядок выполнения работы:

3.1 Повторить разделы курса «Линии передачи. Основные характеристики линий передач», «Классификация линий передачи».

3.2 Подготовить бланк отчета.

3.3 Ответить на вопросы допуска:

Дать определение линии передачи.

Указать разницу между регулярной и нерегулярной линиями.

Выбрать признак классификации типов волн в линии передачи.

Конструктивные особенности линий, способных поддерживать волны типа

### 4. Теоретическая часть

4.1 Собрать схему для определения сопротивления нагрузки, представленную на рисунке 1. Вместо нагрузки подключить на выход измерительной линии короткозамыкающую пластинку.

4.2 Включить лабораторную установку согласно пунктам А.3-А.7 *Приложения А*, выбрав режим работы «Синтез частот и индикатор мощности».

4.3 В соответствии с п.А.14. настроить синтезатор на частоту  $f_0$ , лежащую в пределах от 9800 МГц до 10200 МГц. Включить синтезатор частот, нажав кнопку Старт (рисунок А.1). В измерительную линию поступают СВЧ колебания заданной частоты и мощности.

4.4 Перемещая измерительную головку измерительной линии, поместить ее в положение, соответствующее максимальным показаниям регистратора. Вращая гайки регулировки контура зонда и контура детектора, добиться максимального тока регистратора, настроив измерительную линию на частоту  $f_0$ . При необходимости изменить уровень выходной мощности синтезатора частот.

4.5 Определить положение опорной плоскости (узла напряженности электрического поля при коротком замыкании)  $z_0$  в средней части измерительной линии (рисунок 9), положение соседнего узла  $z'_0$ . Вычислить длину волны в волноводе как удвоенное расстояние между соседними узлами стоячей волны:

$$\lambda_g = |z_0 - z'_0|.$$

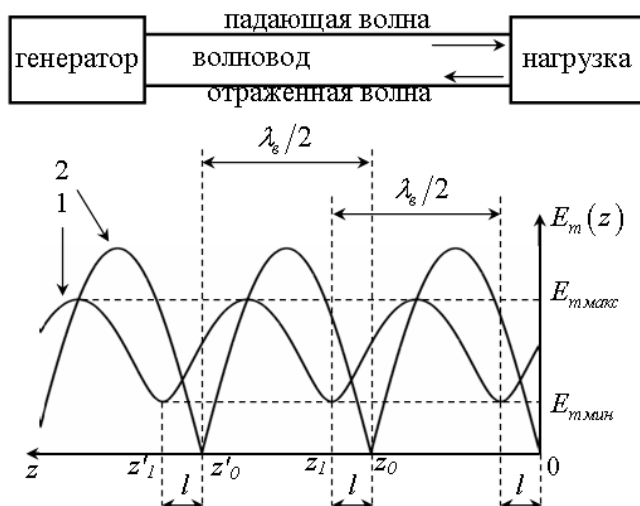


Рисунок 1 – Распределение амплитуды напряженности электрического поля вдоль волновода для режимов стоячей волны и короткого замыкания

4.6 Отключить синтезатор частот, нажав кнопку Стоп (рисунок А.14). Заменить короткозамыкающую пластинку на исследуемую нагрузку. Включить синтезатор частот, нажав кнопку Старт (рисунок А.14).

4.7 Определить положение ближайшего к опорной плоскости  $z_0$  минимума стоячей волны  $z_1$  со стороны синтезатора частот. Вычислить величину  $l$ :

$$l = |z_0 - z_1|.$$

Расстояние  $l$  равно сдвигу минимума в сторону нагрузки при замене нагрузки короткозамыкающей пластиной.

4.8 Перемещая измерительную головку вдоль линии определить значения  $q_{\min}$  и  $q_{\max}$  показаний индикатора, вычислить КСВ в волноводе в случае квадратичности характеристики детектора по формуле:

$$\rho = \sqrt{\frac{q_{\max}}{q_{\min}}},$$

где  $q_{\max}$  и  $q_{\min}$  – показания регистратора измерительной линии в максимуме и минимуме стоячей волны.

4.9 Используя найденные значения КСВ,  $l$  и  $\lambda_g$ , определить и записать возможные сечения включения согласующей реактивности (штыря) – значения  $l_C$  и  $l_L$ .

Согласующая реактивность емкостного характера должна быть помещена на расстоянии от нагрузки:

$$l_C = l + \frac{\lambda_g}{2\pi} \arctg \sqrt{1/\rho} + p \frac{\lambda_g}{2}.$$

Реактивность индуктивного характера должна быть помещена на расстоянии:

$$l_L = l - \frac{\lambda_g}{2\pi} \arctg \sqrt{1/\rho} + p \frac{\lambda_g}{2},$$

где  $p=0, 1, 2, \dots$

4.10 Выключить синтезатор частот, нажав кнопку Стоп (рисунок А.14). Закрыть окно синтезатора частот и индикатора мощности.

4.11 Выполнить действия, описанные в пунктах А.6, А.7, выбрав режим работы «Модуль КП и КО».

4.12 Если необходимо, загрузить калибровочные данные детектора, согласно п.А.8.

4.13 Установить на вкладке «Параметры прибора» (рисунок А.5, п.А.9) частотный диапазон 812 ГГц, количество точек 501, выходная мощность 0 дБм.

4.14 В соответствии с п.А.10 произвести калибровку измерителя P2M-18 в полосе частот 8-12 ГГц для измерения модуля коэффициента отражения.

4.15 Собрать схему установки для изучения процесса согласования нагрузки, (рисунок 2). Нажать кнопку **Старт** (10 на рисунке 4) на панели инструментов. При этом на экране ноутбука можно наблюдать зависимость КСВ от частоты в пределах заданного диапазона.

4.16 Перемещая согласующий штырь вдоль трансформатора, установить его на расстоянии  $l_C$  ( $l_L$ ) от сечения нагрузки. Согласно А.13 сохранить зависимость КСВ( $f$ ).

4.17 Изменяя глубину погружения штыря, добиться уменьшения КСВ на частоте  $f_0$  до минимально возможного значения и сохранить результаты измерений согласно п.А.13.

4.18 Занести экспериментально полученные и рассчитанные данные в таблицу 1.

Таблица 1 – Узкополосное согласование нагрузки. Частота  $f_0 =$  \_\_\_\_\_ МГц



$Z_0$ , ММ	$Z'_0$ , ММ	$\lambda_{в}$ , ММ	$Z_1$ , ММ	$l$ , ММ	$\rho_{\max}$ , ОТН. ед.	$\rho_{\min}$ , ОТН. ед.	$\rho$	$Z_H/Z_X$	$l_C$ , ММ	$l_L$ , ММ	$\rho_{\text{несогл}}$	$\rho_{\text{согл}}$	$\Delta f_{\text{согл}}/f_0$

4.19 Вычислить нормированное значение сопротивления нагрузки  $Z_H/Z_X = R_H/Z_X + iX_H/Z_X$  и занести его в таблицу 1:

$$R_H = \frac{\rho}{\rho^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) + \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right)},$$

$$X_H = -\frac{(\rho^2 - 1) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right)}{\rho^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right) + \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_g} l\right)}.$$

4.20 По снятым экспериментально зависимостям КСВ( $f$ ) определить КСВ при несогласованной  $\rho_{\text{несогл}}$  и согласованной  $\rho_{\text{согл}}$  нагрузках, а также диапазон частот в относительных единицах  $\Delta f_{\text{согл}}/f_0$ , в пределах которого достигнуто согласование.

### 5 Контрольные вопросы:

- 5.1 Что такое одноволновый режим в волноводе?
- 5.2 Какой тип волны является основным в прямоугольном волноводе?
- 5.3 Что такое коэффициент отражения, коэффициент бегущей волны, коэффициент стоячей волны?
- 5.4 Чему равен коэффициент бегущей (стоячей) волны в волноводе с идеально согласованной нагрузкой?
- 5.5 Что такое нормированное сопротивление нагрузки?
- 5.6 Связь сопротивления нагрузки с коэффициентом отражения и коэффициентом стоячей волны.
- 5.7 Почему возникает необходимость в согласовании линий передачи?
- 5.8 Параметры, характеризующие качество согласования.
- 5.9 Способы согласования.
- 5.10 Где необходимо включать согласующее устройство для достижения лучшего качества согласования?
- 5.11 Узкополосное согласование. Основные согласующие устройства.
- 5.12 В чем заключается метод согласования линии с помощью параллельной реактивности?
- 5.13 В каких случаях согласующий штырь является емкостным, в каких – индуктивным?

### 8 Содержание отчета:

- 6.1 Название лабораторной работы.
- 6.2 Цель работы.
- 6.3 Список используемых приборов.
- 6.4 Схему лабораторного макета с учетом условных графических обозначений.
- 6.5 Формулы, результаты расчетов и графики согласно пункту 6.
- 6.6 Обработка результатов измерений согласно пункту 6.
- 6.7 Таблицы согласно пункту 6.

6.8 Вывод по результатам выполненной работы

6.9 Ответы на контрольные вопросы.

#### **4.1. Типовые материалы для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

##### **ПК-1 Способен к проведению профилактических работ на оборудовании связи**

Знает:

– Знает теоретические основы электросвязи и инфокоммуникационных технологий, основы построения взаимосвязанных телекоммуникационных сетей

Умеет:

– проводить сравнительный анализ свойств и характеристик материалов и элементов телекоммуникационных систем для эксплуатации и развития сетевых платформ, систем и сетей передачи данных;

– анализировать структуру электромагнитного поля в различных линиях передачи включая полые и диэлектрические волноводы, а также волоконно-оптические направляющие системы.

Владеет:

– навыками разработки электрических принципиальных схем устройств связи;

– навыками практической работы с современной измерительной аппаратурой.

##### **ПК-3 Способен к выявлению, локализации и устранению неисправности на оборудовании связи, восстановлению схемы организации связи**

Знает:

-принципы действия, конструкции и параметры компонентов и устройств телекоммуникационных систем);

– новейшее оборудование и программное обеспечение;

– общие принципы функционирования аппаратных, программных и программно-аппаратных средств сетевых платформ;

-функции антенн в составе радиоканале.

первичные и вторичные характеристики антенн.

-работу антенн в режиме прием и передачи.

Умеет:

- собирать и анализировать данные о работе узлов сети;

– рассчитывать параметры электрических цепей узлов сетей связи;

– использовать нормативно-техническую документацию при разработке инструкции по эксплуатационно-техническому обслуживанию;

– использовать современные информационно-коммуникационные технологии, в том числе специализированное программное обеспечение для решения задач проектирования и проведения расчетов;

– осуществлять мониторинг и анализировать статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных;

– разрабатывать мероприятия по поддержанию системы на требуемом уровне

Владеет: – навыками разработки схемы организации связи и интеграции в нее новых элементов;

– навыками проведения регламентных работ

Типовые вопросы и задания к экзамену:

- 1.Обобщенная структура радиоканала. Основные параметры составляющих радиоканала: фидерных устройств, антенн и среды распространения и их влияние на качественные характеристики систем радиосвязи.
- 2.Векторы электромагнитного поля, физические законы, лежащие в основе системы уравнений электродинамики.
3. Гармонические поля, их математическое моделирование, материальные уравнения и теоремы электродинамики для гармонических полей.
- 4.Линии передачи и их электрические характеристики. Основные типы линий передачи, использующиеся в фидерных системах. Работа линий передачи в режимах передачи мощности и трансформации сопротивлений.
5. Согласования в фидерных трактах.
- 6.Матричное описание цепей и устройств. Примеры выполнения фидеров для систем радиосвязи различных частотных диапазонов и назначения.
- 7.Плоская волна, как предельный случай сферической волны на локальном участке фронта.
- 8.Решение волнового уравнения для плоских волн.
- 9.Свойства поля плоской волны в идеальных и реальных средах.
10. Падение плоской волны на плоскую границу раздела сред.
- 11.Особенности решения уравнений электродинамики для задач излучения.
- 12.Моделирование реальных источников поля с помощью элементарных излучателей.
- 13.Характеристики поля элементарных излучателей и их физические аналоги: элементарные электрический и магнитный излучатели, элементарный участок фронта волны (элемент Гюйгенса), турникетный излучатель.
14. Возбуждение колебаний в линиях передачи с использованием элементарных излучателей.
- 15.Функции антенн в составе радиоканала.
- 16.Первичные и вторичные характеристики антенн. Работа антенны в режиме приема.
- 17.Вибраторные антенны: распределение тока, диаграмма направленности и входное сопротивление вибратора, связанные вибраторы, конструктивное выполнение вибраторов.
- 18.повышения направленности антенн.
- 19.Линейные и апертурные антенны с непрерывным распределением токов.
- 20.Антенные решетки, особенности управления диаграммой направленности антенных решеток по сравнению с антеннами с непрерывным распределением токов.
- 21.Классификация радиоволн по частотным диапазонам и механизмам распространения. Основные потери в среде распространения.
- 22.Расстояние прямой видимости, область существенная при распространении радиоволн.
- 23.Связь с приподнятыми антеннами, влияние сферичности Земли и параметров подстилающей поверхности.
- 24.Электрофизические характеристики атмосферы, их зависимость от высоты.
25. Основные отличия электрофизических характеристик тропосферы, стратосферы и ионосферы, влияние их на распространение радиоволн.
- 26.Использование в системах связи плавных изменений параметров атмосферы и наличия в ней локальных неоднородностей.
- 27.Факторы, определяющие затухание радиоволн: поглощение в атмосфере и земной поверхности, влияние тропосферной рефракции и рассеяния на неоднородностях.
- 28.Зависимость затухания от частоты и поляризации поля.

29. Помехи в канале распространения. Природные и промышленные помехи. Пространственное и частотное распределение помех.

30. Учет характеристик радиоканала при частотно-территориальном планировании и обеспечении электромагнитной совместимости систем радиосвязи.

Банк контрольных вопросов, заданий и иных материалов, используемых в процессе процедур текущего контроля и промежуточной аттестации находится в учебно-методическом комплексе дисциплины и/или представлен в электронной информационно-образовательной среде по URI: <http://www.aup.uisi.ru/>.

#### **4.2. Методические материалы проведения текущего контроля и промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень методических материалов для подготовки к текущему контролю и промежуточной аттестации:

1. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине «Антенны и распространение радиоволн». –URL: <http://www.aup.uisi.ru/>.
2. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Антенны и распространение радиоволн». –URL: <http://www.aup.uisi.ru/>.