

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Ордена Трудового Красного Знамени
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЗФ СО РАН)

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИСЗФ СО РАН

чл.-корр. РАН _____ А.В. Медведев

« 20 » апреля 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

2.1.7 Распространение радиоволн в неоднородных средах

Научная специальность 1.3.4. Радиофизика

Иркутск 2026

РАБОЧУЮ ПРОГРАММУ разработал кандидат физико-математических наук	Ильин Н.В.
---	------------

1. Место и роль дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Распространение радиоволн в неоднородных средах» входит в образовательный компонент основной профессиональной образовательной программы по научной специальности 1.3.4. Радиофизика.

Дисциплина является обязательной для обучающихся в аспирантуре по научной специальности 1.3.4. Радиофизика

Знания и умения, приобретаемые аспирантами после изучения дисциплины, будут использоваться для решения научных задач на этапе получения и обработки экспериментального материала, и направлены на подготовку к сдаче кандидатского экзамена и к дальнейшей научной работе.

2. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Целью дисциплины «Распространение радиоволн в неоднородных средах» является получение фундаментальных знаний и возможности их использования в процессе дальнейшего обучения, при прохождении практик, написания научных работ, в своей научной и педагогической деятельности.

Задачами дисциплины «Распространение радиоволн в неоднородных средах» является:

- изучение аспирантами современных методов решения задач дистанционного зондирования окружающей среды;
- развитие у аспирантов навыков построения математических моделей распространения волн в различных неоднородных средах;
- знакомство аспирантов с классическими прямыми и обратными задачами распространения скалярных и векторных волн в неоднородной среде;
- сбор, обработка, анализ и систематизация научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта в сфере радиофизики;
- знакомство с новыми теориями и моделями;
- математическое моделирование процессов и объектов;
- обработка полученных результатов на современном уровне и их анализ.

3. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)

Знать:

современные методы решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования окружающей среды электромагнитными сигналами радиодиапазона, основные характеристики распространения радиоволн и влияние на них параметров неоднородной среды, области применимости приближенных методов решения задач распространения и обратных задач.

Уметь:

применять математические методы для решения прямых задач распространения и задач восстановления параметров неоднородной структуры среды по характеристикам зондирующего сигнала и оценивать возможные радиофизические эффекты неоднородностей среды в каналах передачи информации.

Владеть:

Информацией по данной дисциплине, на уровне умения вести дискуссию и отстаивать свою точку зрения. Математическими методами, применяемыми в теории распространения радиоволн, включая статистические методы.

4. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы/108 часов.

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц
Аудиторные занятия (всего)	18/0,5
В том числе:	
Лекции	18/0,5
Семинары	
Самостоятельная работа (всего)	90/2,5
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)	зачет
Контактная работа (всего)	18/0,5
Общая трудоёмкость (часы/зачетные единицы)	108/3

5. Содержание дисциплины

5.1. Содержание разделов и темы дисциплины

Раздел 1. Распространение волн в однородной среде.

Уравнения Максвелла. Спектр сигнала. Параметры среды распространения. Волновое уравнение. Потенциалы. Уравнение Гельмгольца. Функция Грина. Плоские волны. Сферическая волна и ее интегральные представления. Метод стационарной фазы. Поле элементарного диполя. Использование функции Грина. Радиосигнал в однородной среде. Энергетические соотношения. Модификации постановки задачи распространения волн в неоднородных средах.

Раздел 2. Однократное рассеяние волн в неоднородных средах.

Борновское приближение в волновой задаче. Однократно рассеянное поле в дальней зоне. Примеры однократного рассеяния. Рассеяние на вытянутой неоднородности. Рассеяние на метеорном следе. Рассеяние на сплюснутой неоднородности. Рассеяние в случайно неоднородной среде.

Раздел 3. Геометрооптическое приближение в теории распространения волн в неоднородных средах.

Слоистые среды. Одномерная геометрическая оптика (приближение ВКБ). Нормальное падение плоской волны на плоскостойкую среду. Наклонное падение плоской волны на плоский слой. Решение трехмерного волнового уравнения методом геометрической оптики. Решение уравнения эйконала методом характеристик. Лучевые уравнения. Амплитуда волны. Многолучевость и каустики. Радиосигнал в неоднородной среде. Лучи в плоскостойких средах. Линейный безграничный слой. Кусочно-линейный профиль. Параболический (бесконечный) слой. Параболический слой конечной ширины. Волноводное распространение. Теория возмущений в геометрооптических задачах. Решение уравнения эйконала методом возмущений. Метод возмущений в траекторных задачах. Метод усреднения в волноводных лучевых задачах.

Раздел 4. Приближенные методы и методы возмущений в теории распространения радиоволн.

Решение параболического уравнения методом плавных возмущений. Анализ решения и его связи с результатами геометрооптического приближения и теории однократного рассеяния. Статистические характеристики волны в режиме слабых флуктуаций интенсивности.

Интегральное представление для поля точечного источника в плоскостойкой среде. Интегральное представление для поля точечного источника в плоскостойкой среде с кусочно-однородным профилем. Анализ решения, отраженная волна, боковая, поверхностная и вытекающая волны.

Интегральное представление для поля точечного источника в плоскостойкой среде с плавно-неоднородным профилем. Линейный слой. Переходные слои. Параболический

слой. Использование ВКБ решений одномерной задачи и асимптотических методов интегрирования; поле на каустике.

Метод нормальных волн.

Раздел 5. Цифровые методы. Сигналы широкополосные, искажения сигналов в естественных средах.

Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразования, распространение модулированных волн, распространение сигналов разных видов модуляции, искажение формы сигналов при распространении, отражении и рассеянии. Цифровые методы обработки сигналов, использование широкополосных и сверхширокополосных сигналов в зондировании.

5.2. Разделы дисциплины (модуля) и виды занятий

№	Раздел	Всего часов	Аудиторные занятия		СРС	Форма контроля
			Лекции	Практические занятия		
1	Распространение волн в однородной среде	20	2		18	зачет
2	Однократное рассеяние волн в неоднородных средах	22	4		18	зачет
3	Геометрооптическое приближение в теории распространения волн в неоднородных средах	22	4		18	зачет
4	Приближенные методы и методы возмущений в теории распространения радиоволн радиоволн	22	4		18	зачет
5	Цифровые методы. Сигналы широкополосные, искажения сигналов в естественных средах	22	4		18	зачет
Итого (часы)		108	18		90	
Итого (з.е.)		3	0,5		2,5	

5.3. Разделы и темы дисциплины (модуля) и междисциплинарные связи

№ п/п	Наименование обеспечиваемых (последующих) дисциплин и практик	№ № разделов и/или тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых (последующих) дисциплин
1	Радиофизика	T.1-5
2	Исследовательская практика	T.1-5

5.4. Перечень лекционных занятий

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование используемых технологий	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства
1.	Распространение волн в однородной среде	лекция	2	устный опрос
2.	Однократное рассеяние волн в неоднородных средах	лекция	4	устный опрос
3.	Геометрооптическое приближение в теории распространения волн в неоднородных средах	лекция	4	устный опрос
4.	Приближенные методы и методы возмущений в теории распространения радиоволн радиоволн	лекция	4	устный опрос
5.	Цифровые методы. Сигналы широкополосные, искажения сигналов в естественных средах	лекция	4	устный опрос

5.5. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

Данный вид занятий не предусмотрен

5.6. Перечень и содержание самостоятельной работы

Раздел	Тема	Вид самостоятельной работы	Рекомендуемая литература	Всего часов
1	Анизотропия ионосферы, тензор диэлектрической проницаемости.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2); б) дополнительная литература (8-13.)	18
2	Теория возмущений, борновское и рывтовское приближение.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2.,3); б) дополнительная литература (1-14.)	18
3	Многолучевость и каустики, классификация каустик.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2.,3); б) дополнительная литература (1-14.)	18
4	Распространение сигналов, дисперсионные искажения.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2.,3); б) дополнительная литература (1-14.)	18
5	Цифровая обработка сигналов, цифровые методы в зондировании.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2.,3); б) дополнительная литература (1-14.)	9
5	Широкополосные и сверхширокополосные сигналы.	Изучение литературы, конспектирование	а) основная литература (1.,2.,3); б) дополнительная литература (1-14.)	9

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

6.1. Основная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год издания учебной и учебно-методической литературы	Количество экземпляров
1	Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. – М.: Физматлит, 2003.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
2	Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
3	Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. Распространение радиоволн. М.: ЛЕНАНД, 2009.–496 с.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ

6.2. Дополнительная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год издания учебной и учебно-методической литературы	Количество экземпляров
1	Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
2	Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах. М.: Мир, 1986.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ

3	Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
4	Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. - М.: Наука, 1980.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
5	Теоретическая физика: в 10-ти тт.: учеб. пособие. Т.5. Статистическая физика. Ч.1 / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. - 5-е изд. - М. : Физматлит, 2002. - 616 с.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
6	Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
7	Моисеев Н.Н. Асимптотические методы нелинейной механики. М.: Наука, 1969.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
8	Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
9	Введение в статистическую радиофизику: в 2-х ч. Ч.2. Случайные поля / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. - М. : Наука, 1978. - 463 с.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
10	Введение в статистическую радиофизику : в 2-х ч. Ч.1. Случайные процессы / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. - М. : Наука, 1978. - 491 с.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
11	Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических систем. М.: Радио и связь, 1991.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
12	Цейтлин Н. М. Антенная техника и радиоастрономия. М.: Радио и связь, 1976.	1
13	Фельсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн. 1 и 2 том. - М.: Мир, 1978.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ
14	Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999.	ЭБ (http://irbis.iszf.irk.ru): неограниченный доступ

6.3. Профессиональные базы данных, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- Архив наблюдений радиоастрофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (<http://badary.iszf.irk.ru/>)
- NASA ADS (http://adsabs.harvard.edu/ads_abstracts.html).
- Данные отдела физики околоземного космического пространства (<http://dep1.iszf.irk.ru/>)
- Научная база данных Scopus (<https://www.scopus.com>)
- Научные данные (материалы) издательства Cambridge University Press (<http://www.cambridge.org>)

6.4. Информационные, информационно-справочные системы, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- Информационно-справочная информация в библиотеке ИСЗФ СО РАН (<http://irbis.iszf.irk.ru>)
- Государственная публичная научно-техническая библиотека России

- (<http://www.gpntb.ru/>)
- Журналы Американского физического общества (<http://publish.aps.org/>)
- Научная электронная библиотека + Российский Индекс Научного Цитирования (<https://elibrary.ru>)
- Международный каталог и поисковая система по публикациям в области астрофизики (http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html)
- Международная система индексирования публикаций Web of Science (<http://webofknowledge.com>)
- Научные ресурсы зарубежного издательства Elsevier B.V. – Freedom Collection (<https://www.elsevier.com>)
- Новая электронная библиотека (<http://www.newlibrary.ru/genre/nauka/fizika/>)

6.5. Программное обеспечение

Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в том числе отечественного производства используемое при осуществлении образовательного процесса по дисциплине:

- Операционная система Ubuntu 18.04 (свободно распространяемое ПО)
- Офисный пакет Libre Office (свободно распространяемое ПО)
- 7-Zip (свободно распространяемое ПО)
- Adobe Acrobat Reader DC (свободно распространяемое ПО)
- Mozilla Firefox 1 (свободно распространяемое ПО)
- VLC Mediaplayer (свободно распространяемое ПО)
- K-Lite Codec Pack (свободно распространяемое ПО)
- Операционная система Microsoft Windows 10 Pro
- Сервер видеоконференцсвязи Jitsi Meet

7. Образовательные технологии

В учебном процессе используются как активные, так интерактивные формы проведения занятий.

Интерактивные формы включают в себя:

- Лекции;
- Творческие задания в форме изложения проблемного материала;
- Групповые оценки и взаимооценки: а именно рецензирование аспирантами выступлений друг друга.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор). Презентации позволяют качественно иллюстрировать аудиторные занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками и структурировать материал занятия. Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа включает в себя:

- формулирование проблемных вопросов в результате самостоятельного изучения темы с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей;
- конспектирование;

При необходимости, в процессе работы над заданием, аспирант может получить индивидуальную консультацию у преподавателя.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для обучения имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы.

Специальные помещения укомплектованы специализированной мебелью, техническими средствами обучения, служащими для представления информации большой аудитории, компьютерным оборудованием.

9. Контроль качества освоения программы аспирантуры

Цель контроля – получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

Планируемые результаты освоения дисциплины

Знать:

1. современные методы решения задач распространения радиоволн в однородной среде;
2. ключевые актуальные проблемы распространения радиоволн, основные задачи теории распространения радиоволн и методы их решения;
3. современное состояние теории распространения радиоволн, основные проблемы и задачи теории распространения радиоволн в неоднородной среде и методы их решения.
4. достоинства и недостатки современных методов решения задач распространения радиоволн в среде.
5. современные теоретические модели ионосферы и распространения радиоволн, основные методы приближенного решения задач распространения радиоволн в неоднородной среде
6. основные факторы влияния неоднородной среды на характеристики распространения радиоволн
7. области применимости приближенных методов решения основных задач
8. современные методы решения прямых и обратных задач дистанционного зондирования окружающей среды электромагнитными сигналами радиодиапазона.

Уметь:

1. применить современные методы анализа и решения задач определения электромагнитного поля радиоволн в атмосфере;
2. определить наиболее эффективные приближенные методы решения задач распространения волн в различных средах;
3. сформулировать задачу и методы исследований ключевых задач распространения радиоволн;
4. применять результаты теоретических исследований к интерпретации данных наблюдений;
5. определять влияние возмущения околоземной плазмы на характеристики распространения радиоволн
6. формулировать основные задачи распространения радиоволн в неоднородной среде
7. применять математические методы для описания процесса распространения радиоволн в неоднородной среде и решения прямых и обратных задач зондирования
8. находить и анализировать экспериментальные данные.

Владеть:

1. терминологией и основными понятиями теории распространения радиоволн;

2. основными математическими методами описания поля в среде;
3. математическими методами описания, моделирования и анализа распространения радиоволн в неоднородной среде
4. технологиями моделирования физических процессов в неоднородной среде при распространении радиоволн;
5. математическими методами моделирования физических процессов в неоднородной среде при распространении радиоволн;
6. методами качественной оценки данных зондирования неоднородной среды;
7. информацией по данной дисциплине, на уровне умения вести дискуссию и отстаивать свою точку зрения.

Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости аспиранта, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущий контроль знаний обучающихся организован как устный групповой опрос.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений аспиранта.

Объектами оценивания выступают:

- Учебная дисциплина - активность на занятиях, своевременность выполнения различных видов заданий, посещаемость занятий;
- Степень усвоения теоретических знаний.

Характеристика ОС для обеспечения текущего контроля по дисциплине

Раздел/Тема	ОС	Содержание задания
1-5	Собеседование	Обсуждение на занятии проблемных вопросов по изученному разделу

Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация аспирантов по дисциплине осуществляется по окончанию дисциплины, в виде **зачета** в соответствии с графиком учебного процесса. Проверка наличия конспектов по дисциплине является допуском к зачету. В случае наличия учебной задолженности (пропущенных занятий и (или) невыполненных заданий), аспирант отрабатывает пропущенные занятия и выполняет задания.

Вопросы и задания для зачёта

Знать:

1. Уравнения Максвелла в дифференциальной и интегральной форме.
2. Волновые уравнения для полей и потенциалов.
3. Тензор диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы.
4. Поляризационное расщепление и двойное лучепреломление, обыкновенная и необыкновенная волна.
5. Зависимость тензора диэлектрической проницаемости от частоты, дисперсия.
6. Преломление и отражение от плоского слоя, отраженная, боковая, поверхностная волна.
7. Борновское приближение в волновой задаче.
8. Одномерная геометрическая оптика (приближение ВКБ).
9. Асимптотический характер геометрической оптики, отсутствие асимптотик при наличии поглощения.
10. Нарушение асимптотик, явление Стокса, линии Стокса.
11. Решение трехмерного волнового уравнения методом геометрической оптики.
12. Многолучевость и каустики.

13. Радиосигнал в неоднородной среде.
14. Теория возмущений в геометрических задачах.
15. Средние характеристики геометрической волны в случайно неоднородной среде.
16. Статистические характеристики волны в режиме слабых флуктуации интенсивности.
17. Модель фазового экрана.
18. Дифракция.
19. Интегральное представление для поля точечного источника в плоскостной среде.
20. Отраженная волна, боковая, поверхностная и вытекающая волны.
21. Метод нормальных волн.
22. Плавный неоднородный волновод, адиабатическое приближение.
23. Метод Маслова (метод канонического оператора).
24. Дисперсионные искажения сигналов.
25. Сигналы с большой базой, ЛЧМ сигналы.

Уметь:

1. Написать соотношения Крамерса – Кронига.
2. Написать волновые уравнения для полей и потенциалов.
3. Общий вид дисперсионного уравнения. Частотная дисперсия диэлектрической и магнитной проницаемостей.
4. Вычислить спектр гауссова сигнала.
5. Квадратурные компоненты радиосигнала.
6. Вычислить автокорреляционную функцию импульсного ЛЧМ сигнала.
7. Оценить дисперсионное расплывание прямоугольного радиоимпульса.
8. Описать прохождение радиосигнала через цепь с сосредоточенными параметрами.
9. Описать работу синхронного детектора.
10. Написать уравнение эйконала.
11. Написать уравнение неоднородной плоской волны.
12. Качественно описать распространение радиосигнала в неоднородной среде без дисперсии.
13. Качественно описать распространение радиосигнала в однородной среде с дисперсией.
14. Описать отличие обыкновенной волны от необыкновенной.
15. Объяснить двойное лучепреломление в ионосфере.

Владеть:

1. Частотное и временное представление сигнала.
2. Метод теории возмущений для задачи рассеяния на шероховатой поверхности.
3. Метод интеграла наложения (Дюамеля) при распространении в стационарной неоднородной среде.
4. Метод геометрической оптики в однородной среде, отражение от резкой границы.
5. Асимптотические по волновому числу методы анализа поля.
6. Методы цифровой обработки сигналов. Дискретизация импульсного сигнала.

Критерии оценки:

- оценка «зачтено» выставляется аспиранту, если основной материал усвоен, аспирант приобрел необходимые знания и умения;
- оценка «не зачтено» - если основной материал усвоен недостаточно, аспирант не приобрел необходимых знаний и умений