

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
радиотехники и компьютерных  
технологий**

**Д.А. Гаврилов**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Цифровая обработка сигналов в волоконно-оптических линиях связи
<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра мультимедийных технологий и телекоммуникаций
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: П.В. Плотников, канд. техн. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры мультимедийных технологий и телекоммуникаций 30.03.2023

## Аннотация

Данный курс ознакомит студентов с основными принципами и алгоритмами обработки оптических сигналов, применяемых в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). В рамках данного курса будет проведён обзор оптических технологий, устройств, основных принципов построения ВОЛС, рассмотрена структура цифровых систем передачи информации, методы компенсации искажений оптического сигнала, передаваемого в ВОЛС. В результате данного курса студент будет обладать достаточными знаниями для исследования перспективных методов цифровой обработки сигналов.

Курс проходит в формате лекций и семинаров. Для успешного прохождения курсов необходимо посещение и конспектирование лекций, выполнение практических работ на семинарах и самостоятельная работа с дополнительной литературой.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- изучение основных принципов и алгоритмов обработки оптических сигналов, применяемых в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС).

#### Задачи дисциплины

- Освоение студентами основных принципов работы ВОЛС;
- приобретение практических навыков применения современных методов и стандартов цифровой обработки сигналов (ЦОС).

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем своей профессиональной деятельности, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные и прикладные научные знания в области естественных наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.2 Владеет навыками реализации новых принципов и методов исследования в современных инфокоммуникационных системах и сетях

ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Умеет использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций при поиске научно-технической информации в своей профессиональной деятельности
--	---

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Общую структуру цифровых систем передачи видеоинформации;
- основы статистического (энтропийного) кодирования;
- методы устранения визуальной избыточности статических и динамических изображений;
- стандарты кодирования статических и динамических изображений.

уметь:

- Применять знания основ и технологий ЦОС.

владеть:

- Основными методами компенсации искажений оптического сигнала, передающегося в ВОЛС;
- теоретическими и экспериментальными методами исследования с целью изучения перспективных методов ЦОС.

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Обзор оптических технологий, устройств, основные принципы построения ВОЛС	2			2
2	Структура оптических передатчика и приемника	4			4
3	Модуляция и формирование сигнального созвездия	4			4
4	Высокоскоростные АЦП/ЦАП	4			4
5	Алгоритмы синхронизации	4			4
6	Адаптивная линейная эквализация (СМА/ММА/LMS) и полифазные архитектуры	4	8		12
7	Нелинейность оптического волокна и алгоритмы ее компенсации (PBM, DBP)	4			4
8	Компенсация искажений устройств (QDC/QMC, Volterra NLE)	4	7		11
Итого часов		30	15		45

Подготовка к экзамену	0 час.
Общая трудоёмкость	90 час., 2 зач.ед.

## 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

### Семестр: 1 (Осенний)

#### 1. Обзор оптических технологий, устройств, основные принципы построения ВОЛС

Обзор современных технологий волоконно-оптической связи. Принципы построения ВОЛС, технология DWDM. Обзор оборудования, применяемого при построении ВОЛС, типы, основные характеристики.

#### 2. Структура оптических передатчика и приемника

Основные характеристики оптоволоконных систем связи. Обзор основных блоков передатчика (канальный кодер, модулятор, ЦАП, электрооптический преобразователь). Математические модели оптического канала. Обзор основных блоков приёмника (оптоэлектронный преобразователь, АЦП, блоки синхронизации, эквалайзер, демодулятор, канальный декодер). Критерии эффективности оптической системы связи.

#### 3. Модуляция и формирование сигнального созвездия

КАМ модуляции. Количество информации и предел Шеннона. Геометрический шейпинг созвездия. Вероятностный шейпинг созвездия. Нумерационное кодирование и схема Ковера.

#### 4. Высокоскоростные АЦП/ЦАП

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Виды АЦП (параллельный АЦП, сигма-дельта АЦП, АЦП последовательного приближения, конвеерный АЦП, АЦП с временным уплотнением). Виды ЦАП (ЦАП на основе резистивной матрицы, ЦАП с токовыми ключами, ЦАП с временным или частотным уплотнением). Основные характеристики АЦП/ЦАП. Применение АЦП/ЦАП в оптических приёмопередатчиках. Линейные и нелинейные искажения в АЦП/ЦАП с временным уплотнением и методы их калибровки. Уменьшение шума квантования АЦП/ЦАП (динамическое квантование).

#### 5. Алгоритмы синхронизации

Временная синхронизация: дробная интерполяция, тактовая синхронизация, алгоритм Гарднера, алгоритм Годарда; Фазовая/частотная синхронизация: петля Костаса, BPS, VV.

#### 6. Адаптивная линейная эквализация (СМА/ММА/LMS) и полифазные архитектуры

Критерии адаптации, слепые и управляемые решением эквалайзеры, линейный эквалайзер, decision-feedback эквалайзер, ММО эквалайзер.

#### 7. Нелинейность оптического волокна и алгоритмы ее компенсации (PBM, DBP)

Математическая модель оптоволоконного канала связи. Алгоритм компенсации нелинейных искажений на основе теории возмущений (PBM – perturbation based model). Алгоритм компенсации нелинейных искажений с помощью технологии цифрового обратного распространения (DBP – Digital Back Propagation).

## 8. Компенсация искажений устройств (QDC/QMC, Volterra NLE)

Оптоэлектронные устройства: лазеры, драйверы модулятора (усилители), модуляторы, приёмные устройства, трансимпедансные усилители (TIA). Типы искажений: линейные (с памятью), I/Q-имбаланс, нелинейные. Цифровые модели для компенсации искажений: КИХ-фильтр, QMC/QDC, MIMO, Volterra NLE.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Аудитория с мультимедийным проектором и компьютером, аудиторная доска.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / В. Б. Топильский. — М. : Техносфера, 2014. — 288 с.
2. Основы цифровой обработки сигналов [Текст] : в 3 ч. : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Романюк ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Моск. физико-техн. ин-т (гос. ун-т). — М. : МФТИ, 2005. — Ч. 1 : Свойства и преобразования дискретных сигналов. - 2005. - Библиогр.: с. 326-327. - 700 экз. - ISBN 5-7417-0144-2.
3. Основы цифровой обработки сигналов [Текст], учеб. пособие для вузов / А. И. Солонина [и др.]. - СПб., БХВ-Петербург, 2005

### Дополнительная литература

1. Основы теории цифровой обработки сигналов [Текст] / С. В. Умняшкин - М. ТЕХНОСФЕРА, 2017

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.dsplib.ru/> – теория и практика цифровой связи
2. <http://www.edu.ru> – федеральный портал «Российское образование».
3. <http://benran.ru> – библиотека по естественным наукам Российской академии наук.
4. <http://minsvyaz.ru/ru/documents/> – нормативно-правовые документы Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации
5. <http://www.itu.int/pub/T-REC/> – Рекомендации Сектора стандартизации телекоммуникаций Международного союза электросвязи МСЭ-Т
6. <http://www.itu.int/pub/R-REC/> – Рекомендации Сектора радиосвязи Международного союза электросвязи МСЭ-Р
7. <http://www.etsi.org/standards-search/> – стандарты Европейского института стандартизации телекоммуникаций ETSI
8. <http://www.ietf.org/rfc.html/> – документы инженерной рабочей группы Интернет RFC IETF

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

В процессе практических занятий используются программные пакеты Matlab.

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Успешное освоение курса «Цифровая обработка сигналов в волоконно-оптических линиях связи» требует большой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, семинаров, учебной и научной литературе);
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- выполнение самостоятельных работ в среде Octave,
- подготовку к контрольным, самостоятельным работам и тестам.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в результате анализа итогов контрольных, самостоятельных работ, а также индивидуальных консультаций.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Инфокоммуникационные технологии и системы связи
<b>профиль подготовки:</b>	Телекоммуникационные сети и системы Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий кафедра мультимедийных технологий и телекоммуникаций
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** П.В. Плотников, канд. техн. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий	УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Способен представлять современную научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблем своей профессиональной деятельности, определять пути их решения и оценивать эффективность сделанного выбора	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные и прикладные научные знания в области естественных наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Способен реализовывать новые принципы и методы исследования современных инфокоммуникационных систем и сетей различных типов передачи, распределения, обработки и хранения информации	ОПК-2.2 Владеет навыками реализации новых принципов и методов исследования в современных инфокоммуникационных системах и сетях
ОПК-3 Способен приобретать, обрабатывать и использовать новую информацию в своей предметной области, предлагать новые идеи и подходы к решению задач своей профессиональной деятельности	ОПК-3.1 Умеет использовать современные информационные и компьютерные технологии, средства коммуникаций при поиске научно-технической информации в своей профессиональной деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Цифровая обработка сигналов в волоконно-оптических линиях связи» обучающийся должен:

### знать:

- Общую структуру цифровых систем передачи видеоинформации;
- основы статистического (энтропийного) кодирования;
- методы устранения визуальной избыточности статических и динамических изображений;
- стандарты кодирования статических и динамических изображений.

### уметь:

- Применять знания основ и технологий ЦОС.

### владеть:



- Основными методами компенсации искажений оптического сигнала, передающегося в ВОЛС;
- теоретическими и экспериментальными методами исследования с целью изучения перспективных методов ЦОС.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

1. Информационная теорема.
2. Виды статистического кодирования.
3. Виды кодирования сигнала.
4. Модуляция оптического сигнала, основные типы, применяемые в ВОЛС.
5. Количество информации и предел Шеннона.
6. Основные алгоритмы синхронизации.
7. Линейная эквалаизация, принципы построения адаптивных эквалайзеров.
8. Цифровые модели компенсации искажений в ВОЛС.
9. Основные типы искажений в ВОЛС.
10. Оптоэлектронные устройства, используемые в приёмном оборудовании ВОЛС.
11. Оптоэлектронные устройства, используемые в передающем оборудовании ВОЛС
12. Основные характеристики оптоволоконных систем связи.
13. Математические модели оптического канала.
14. Критерии эффективности оптических систем связи.
15. Математическая модель оптоволоконного канала связи.
16. Алгоритм компенсации нелинейных искажений на основе теории возмущений.
17. Алгоритм компенсации нелинейных искажений с помощью цифрового обратного распространения.
18. Принципы построения волоконно-оптических систем связи. Типы узлов и их назначение.
19. Обзор оборудования DWDM, назначение, основные характеристики.
20. Нумерационное кодирование и схема Ковера.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

1. Современные технологии волоконно-оптической связи.
2. Принципы построения ВОЛС, технология DWDM.
3. Оборудования, применяемого при построении ВОЛС, типы, основные характеристики.
4. Основные характеристики оптоволоконных систем связи.
5. Основные блоки передатчика (канальный кодер, модулятор, ЦАП, электрооптический преобразователь).
6. Математические модели оптического канала.
7. Основные блоки приёмника (оптоэлектронный преобразователь, АЦП, блоки синхронизации, эквалайзер, демодулятор, канальный декодер).
8. Критерии эффективности оптической системы связи.
9. КАМ модуляции. Количество информации и предел Шеннона.
10. Геометрический шейпинг созвездия. Вероятностный шейпинг созвездия.
11. Нумерационное кодирование и схема Ковера
12. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи.
13. Виды АЦП (параллельный АЦП, сигма-дельта АЦП, АЦП последовательного приближения, конвейерный АЦП, АЦП с временным уплотнением).
14. Виды ЦАП (ЦАП на основе резистивной матрицы, ЦАП с токовыми ключами, ЦАП с временным или частотным уплотнением).
15. Основные характеристики АЦП/ЦАП.
16. Применение АЦП/ЦАП в оптических приёмопередатчиках.
17. Линейные и нелинейные искажения в АЦП/ЦАП с временным уплотнением и методы их калибровки.

18. Уменьшение шума квантования АЦП/ЦАП (динамическое квантование).
19. Временная синхронизация: дробная интерполяция, тактовая синхронизация, алгоритм Гарднера, алгоритм Годарда; Фазовая/частотная синхронизация: петля Костаса, BPS, VV.
20. Критерии адаптации, слепые и управляемые решением эквалайзеры, линейный эквалайзер, decision-feedback эквалайзер, ММО эквалайзер
21. Математическая модель оптоволоконного канала связи.
22. Алгоритм компенсации нелинейных искажений на основе теории возмущений (PBM – perturbation based model).
23. Алгоритм компенсации нелинейных искажений с помощью технологии цифрового обратного распространения (DBP – Digital Back Propagation).
24. Оптоэлектронные устройства: лазеры, драйверы модулятора (усилители), модуляторы, приёмные устройства, трансимпедансные усилители (TIA).
25. Типы искажений: линейные (с памятью), I/Q-имбаланс, нелинейные.
26. Цифровые модели для компенсации искажений: КИХ-фильтр, QMC/QDC, ММО, Volterra NLE.

#### Критерии оценивания

Оценка отлично (10) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (9) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично (8) выставляется студенту, показавшему систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо (7) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо (6) выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо (5) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно (4) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно (3) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно (2) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно (1) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится в устной форме. При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 20 минут на подготовку. Опрос обучающегося проводится в течение 30 минут.

Во время проведения экзамена и зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины.