



И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев, И. Е. Мухин

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ
Цифровые системы передачи данных

Учебное пособие

Курск 2019

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев, И. Е. Мухин

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Учебное пособие

*Утверждено Учебно-методическим советом
Юго-Западного государственного университета*

Курск 2019

УДК 621.391(075.8)

ББК 38.811я7

Б 12

Рецензенты:

Доктор технических наук, главный научный сотрудник НИИЦ (г. Курск)

«18 ЦНИИ» МО РФ *В. Г. Довбня*

Кандидат технических наук, начальник отдела управления персоналом

кадрового делопроизводства АО «Авиаавтоматика»

им. В. В. Тарасова» *Ю. А. Векленко*

Бабанин И. Г.

Б 12 Общая теория связи. Цифровые системы передачи данных: учеб. пособие / И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев, И. Е. Мухин; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 106 с. – Библиогр.: 104–105 с.

ISBN 978-5-7681-1429-9

Содержание учебного пособия соответствует требованиям ФГОС ВО по техническим специальностям и направлениям подготовки. Учебное пособие является теоретической базой, позволяющей специалисту в области телекоммуникаций квалифицированно эксплуатировать современные телекоммуникационные системы, уверенно ориентироваться среди множества устройств и систем связи, представленных на рынке, четко представлять их сильные и слабые стороны, пути их совершенствования. Рассмотрены вопросы теории помехоустойчивости систем передачи сообщений, принципы организации многоканальной связи, характеристики и показатели эффективности систем связи, вопросы их оптимизации, а также основы цифровой обработки сигналов.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» очной и заочной форм обучения, а также для аспирантов и преподавателей вузов, специализирующихся в области разработки и эксплуатации систем передачи аналоговой информации.

УДК 621.391(075.8)

ББК 38.811я7

ISBN 978-5-7681-1429-9

© Юго-Западный государственный университет, 2019

© Бабанин И. Г., Коптев Д. С., Мухин И. Е., 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ТЕОРИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ	10
1.1. Критерии качества и правила приема дискретных сообщений	10
1.2. Синтез алгоритмов и схем оптимальных приемников	16
1.3. Потенциальная помехоустойчивость при точно известном множестве сигналов	19
1.4. Количественная мера информации дискретного источника	21
1.5. Кодирование источника. Коды Шеннона – Фано, Хаффмана	26
1.6. Помехоустойчивое кодирование. Систематический код Хэмминга.....	32
Контрольные вопросы и задания для самопроверки.....	40
2. ПРИНЦИПЫ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СВЯЗИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ	43
2.1. Цифровая передача непрерывных сообщений.....	43
2.2. Импульсно-кодовая модуляция	44
2.3. Дифференциальная ИКМ, дельта-модуляция	50
2.4. Основные положения теории разделения сигналов в системах многоканальной связи	51
2.5. Принципы распределения информации в сетях связи.....	59
Контрольные вопросы и задания для самопроверки.....	61
3. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ СВЯЗИ.....	63
3.1. Характеристики и показатели эффективности систем передачи информации	63
3.2. Общая методология оптимизации систем связи	68
Контрольные вопросы.....	70
4. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ.....	71
4.1. Цифровые фильтры обработки сигналов	71
4.2. Весовые функции	72
4.3. Синтез цифровых фильтров	79
4.4. Фильтр Колмогорова – Винера.....	86
Контрольные вопросы.....	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	104

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью данного учебного пособия является изучение теоретических основ дисциплин «Общая теория связи» и «Теория электрической связи».

Содержание учебного пособия соответствует требованиям федерального государственного образовательного стандарта высшего образования для студентов специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» и направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», рабочим программам соответствующих дисциплин и основным задачам их освоения.

Пособие является теоретической базой, позволяющей специалисту в области телекоммуникаций квалифицированно эксплуатировать современные телекоммуникационные системы, уверенно ориентироваться среди множества устройств и систем связи, представленных на рынке, четко представлять их сильные и слабые стороны, пути их совершенствования.

Содержание учебного пособия составляют следующие вопросы:

- теория помехоустойчивости систем передачи сообщений;
- помехоустойчивое кодирование;
- принципы организации многоканальных систем передачи информации;
- проблемы эффективности и оптимизации систем связи;
- цифровая обработка сигналов;
- оптимальная и адаптивная фильтрация сигналов.

Освоение вышеприведенных вопросов нацелено на формирование следующих компетенций:

- способность проводить инструментальные измерения, используемые в области инфокоммуникационных технологий и систем связи;

- умение проводить расчеты по проекту сетей, сооружений и средств инфокоммуникаций в соответствии с техническим заданием с использованием как стандартных методов, приемов и средств

автоматизации проектирования, так и самостоятельно создаваемых оригинальных программ;

– способность применять положения теорий электрических цепей, радиотехнических сигналов, распространения радиоволн, цифровой обработки сигналов, информации и кодирования, электрической связи для решения профессиональных задач.

При подготовке пособия использованы теоретические положения, отраженные в монографиях, научных статьях, учебной литературе.

КРАТКИЙ СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЙ

АИМ	амплитудно-импульсная модуляция
АМ	амплитудная модуляция
АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
БШ	белый шум
ВАХ	вольт-амперная характеристика
ИФР	интегральная функция распределения
ИФНЧ	идеальный фильтр низких частот
ИХ	импульсная характеристика
ЛЭЦ	линейная электрическая цепь
МО	математическое ожидание
МСИ	межсимвольная интерференция
НЭ	нелинейный элемент
НЭЦ	нелинейная электрическая цепь
ОСП	отношение сигнал-помеха
ПВ	плотность вероятностей
ПФ	полосовой фильтр
ПЭЦ	параметрическая электрическая цепь
СВ	случайная величина
СМХ	статическая модуляционная характеристика
СП	случайный процесс
ФД	фазовый детектор
ФК	функция корреляции
ФМ	фазовая модуляция
ФНЧ	фильтр низких частот
ЧМ	частотная модуляция
ЧД	частотный детектор

ВВЕДЕНИЕ

Новейший этап научно-технического прогресса в мире связан с революционными изменениями в передаче, приеме и обработке информации, что оказывает существенное влияние на все стороны жизни общества. Все это стало возможным благодаря успехам в развитии цифровых инфокоммуникационных технологий.

Курсы «Общая теория связи» и «Теория электрической связи» являются основными дисциплинами из учебных планов направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» в области исследования и разработки телекоммуникаций. Основной целью курсов является формирование знаний основ теорий передачи и кодирования сообщений, методов передачи и приема дискретных и непрерывных сообщений, цифровых методов передачи сообщений, принципов построения многоканальных систем передачи и методов повышения эффективности систем электросвязи, а также умений использовать методы анализа систем электрической связи для количественной оценки их эффективности.

Дисциплины отличаются разнообразием содержания, обилием понятий и методов, причем большую роль играют математические приемы анализа. Прочное овладение ими совершенно обязательно, поскольку они служат логическим фундаментом построения последующих «связных» курсов. Знания и умения по дисциплине являются составной частью общепрофессиональной подготовки к самостоятельной инженерно-эксплуатационной деятельности. Дисциплины базируются на предшествующем изучении физики, математики, дискретной математики, теории вероятностей, математической статистики и информатики.

Основы современной общей теории связи были заложены в фундаментальных работах В. А. Котельникова по теории потенциальной помехоустойчивости (1947 г.) и К. Шеннона по теории информации (1948 г.). Отдельные вопросы теории связи рассматривались в более ранних работах Х. Найквиста (1928 г.) и В. А. Котель-

никова (1933 г.), в которых сформулирована и доказана теорема отсчетов, в работе Р. Хартли (1928 г.), где была введена логарифмическая мера количества информации. В создании и развитии статистической теории связи большую роль сыграли работы А. Я. Хинчина (1938 г.) по корреляционной теории стационарных случайных процессов, А. Н. Колмогорова (1941 г.) и Н. Винера (1947 г.) по интерполированию и экстраполированию стационарных случайных последовательностей, А. Вальда (1950 г.) по теории статистических решений. Дальнейшее развитие теория получила в работах В. И. Сифорова, А. А. Харкевича, Л. М. Финка, Б. Р. Левина, Р. Л. Добрушина, Д. Д. Кловского, Д. Миддлтона, Р. Райса, Р. Галлагера, К. Хелстрема, А. Файнштейна, Р. Фано и многих других отечественных и зарубежных ученых.

Классическая теория помехоустойчивости при флуктуационных помехах развита в этих работах для каналов со случайно изменяющимися параметрами и продолжает развиваться в направлении учета реальных характеристик сигналов и помех, в том числе нестационарных. Вопросы синтеза оптимальных приемников непрерывных и импульсных сигналов успешно решаются на основании теории нелинейной фильтрации. Дальнейшим шагом является разработка и применение методов построения адаптивных систем, позволяющих обеспечить высокую достоверность передачи сообщений в каналах с переменными параметрами при неполной априорной информации о сигналах и помехах.

Современная теория связи позволяет достаточно полно оценить различные системы по их помехоустойчивости и эффективности и тем самым определить, какие из них являются наиболее перспективными. Она достаточно четко указывает не только возможности совершенствования существующих систем связи, но и пути создания новых, более совершенных систем.

В настоящее время речь идёт о создании систем, в которых достигаются показатели эффективности, близкие к предельным. Одновременное требование высоких скоростей и верности передачи приводит к необходимости применения систем, в которых используются многопозиционные сигналы и мощные корректирую-

щие коды. Наиболее совершенная система связи должна быть саморегулирующей (адаптивной) системой.

Однако не следует думать, что во всех случаях необходимо стремиться к созданию сложных систем, отбрасывая простые как менее совершенные. Разработка наиболее совершенных систем передачи информации всегда должна базироваться на технико-экономическом расчете. Сложность систем не должна превосходить определенного экономически обоснованного уровня. По этой причине не следует чрезмерно усложнять системы в погоне за их максимальным совершенством. В ряде случаев более простые системы могут иметь необходимую степень совершенства, а экономически быть более целесообразными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе развития теории электрической связи были решены вопросы, связанные с формированием и оптимальной обработкой сигналов в каналах связи с различными характеристиками, предложены эффективные методы помехоустойчивого кодирования. В то же время эти достижения еще далеко не полностью используются в современной технике связи. Существует известный разрыв между достижениями науки и их внедрением, определяемый необходимым временем на разработку и освоение в производстве новой аппаратуры.

Переход к цифровым методам передачи сообщений и цифровой обработке сигналов при широком использовании микропроцессорной техники обеспечивает возможности интеграции средств связи и вычислительных средств. На этой основе создаются интегральные цифровые сети, в которых достигается не только объединение по видам связи и услуг, но и общая программно-аппаратная реализация систем передачи, обработки, коммутации, управления и контроля.

Интегральные сети, объединяющие в единый комплекс вычислительные и информационные системы на базе современных ЭВМ, образуют единую информационно-коммуникационную сеть. Информационно-коммуникационные сети являются технической основой информатизации отраслей, регионов, стран, мирового сообщества.

Проблемы информатизации предъявляют высокие требования как к вычислительной технике, так и к технике связи. Для техники связи это прежде всего требования высоких скоростей (порядка гигабит и более в секунду), малых вероятностей ошибок (порядка $10^{-10} \dots 10^{-11}$), больших дальностей передачи (до 100 млн км в системах космической связи), малого веса и энергопотребления аппаратуры.

Однако даже при использовании современных технологий проектирование систем связи с высокими показателями эффектив-

ности ставит перед теорией электрической связи ряд новых нерешенных задач и проблем.

Настоящее пособие призвано дать начальные знания по современным технологиям преобразования и передачи сообщений и сигналов по каналам связи. Эти знания, являясь базовыми, позволят читателям видеть и понимать состояние и тенденции развития современных информационных систем, ориентироваться во всем их многообразии, в том числе и по многочисленным публикациям.

К рассмотренным в пособии технологиям относятся: теория потенциальной помехоустойчивости, кодирование, организация многоканальных систем передачи, вопросы цифровой обработки сигналов, фильтрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аджемов, А. С. Общая теория связи: учеб. / А. С. Аджемов, В. Г. Санников. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 624 с.
2. Акулиничев, Ю. П. Теория электрической связи / Ю. П. Акулиничев. – М.: Лань, 2010. – 240 с.
3. Андреев, Р. Н. Теория электрической связи: курс лекций: учеб. пособие / Р. Н. Андреев, Р. П. Краснов, М. Ю. Чепелев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 230 с.
4. Бабанин, И. Г. Общая теория связи. Сигналы и аналоговые системы передачи информации: учеб. пособие / И. Г. Бабанин, Д. С. Коптев; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 110 с.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. / С. И. Баскаков. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 462 с.
6. Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей: учеб. / А. Ф. Белецкий. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.
7. Биккенин, Р. Р. Теория электрической связи / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. – М.: Академия, 2010. – 336 с.
8. Васильев, К. К. Теория электрической связи: учеб. пособие / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов; под общ. ред. К. К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с.
9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 720 с.
10. Зюко, А. Г. Теория передачи сигналов: учеб. / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров. – М.: Связь, 1980. – 288 с.
11. Ключев, Л. Л. Теория электрической связи / Л. Л. Ключев. – М.: Техноперспектива, 2008. – 424 с.
12. Коптев, Д. С. Теория радиотехнических сигналов: учеб. пособие / Д. С. Коптев, И. Г. Бабанин, В. Г. Довбня; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2019. – 240 с.
13. Лукьянюк, С. Г. Теория электрической связи. Сигналы, помехи и системы передачи: учеб. пособие / С. Г. Лукьянюк, А. М. Потапенко; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2012. – 223 с.
14. Многоканальные системы передачи: учеб. / Н. Н. Баева, В. Н. Гордиенко, С. А. Курицын [и др.]; под ред. Н. Н. Баевой и В. Н. Гордиенко. – М.: Радио и связь, 1997. – 560 с.

15. Мухин, И. Е. Методологические основы синтеза систем диагностики технического состояния космических и летательных аппаратов: монография / И. Е. Мухин, А. И. Мухин, С. Н. Михайлов [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 211 с.
16. Мухин, И. Е. Методологические основы синтеза систем обеспечения электромагнитного доступа средствами радиомониторинга современных систем телекоммуникаций: монография / И. Е. Мухин, А. В. Хмелевская, И. Г. Бабанин; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2016. – 316 с.
17. Мухин, И. Е. Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры с учётом обеспечения электромагнитной совместимости: уч. пособие / И. Е. Мухин, А. В. Хмелевская, Д. С. Коптев; Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 140 с.
18. Прокис, Дж. Цифровая связь: пер. с англ. / Дж. Прокис; под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
19. Персональный сайт профессора Давыдова А. В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://geo.in.org/> (дата обращения 04.10.2019 г.)
20. Шварцман, В. О. Теория передачи дискретной информации: учеб. / В. О. Шварцман, Г. А. Емельянов. – М.: Связь, 1979. – 424 с.

Учебное издание

Бабанин Иван Геннадьевич
Коптев Дмитрий Сергеевич
Мухин Иван Ефимович

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СВЯЗИ
ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Учебное пособие

Редактор *Н. В. Комардина*
Компьютерная верстка и макет *О. В. Кофановой*

Подписано печать 28.11.19. Формат 60x841/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 6,2. Уч.-изд. л. 5,6. Тираж 100 экз. Заказ 91.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.
Отпечатано в ЮЗГУ.