

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Инженерно-технологическая академия

**СЕТИ СВЯЗИ  
ДЛЯ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СИСТЕМ  
В УСЛОВИЯХ КАНАЛА С ПЕРЕОТРАЖЕНИЯМИ  
НА ОСНОВЕ OFDM-ММО-ПРИНЦИПОВ**

*Монография*

Ростов-на-Дону – Таганрог  
Издательство Южного федерального университета  
2019

УДК 621.376  
ББК 32.811.3  
Ф338

*Печатается по решению экспертной группы комитета  
по инженерному направлению науки и образования при Ученом совете  
Южного федерального университета (протокол № 7 от 17 апреля 2019 г.)*

**Рецензенты:**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
начальник Службы качества, ученый секретарь АО «Таганрогский  
научно-исследовательский институт связи» *А. Ф. Гришко*

кандидат техн. наук, заведующий отделом АО «Научно-конструкторское  
бюро вычислительных систем», г. Таганрог *Д. С. Толкачев*

**Федосов, В. П.**

Ф338 Сети связи для многопользовательских систем в условиях канала  
с переотражениями на основе OFDM-MIMO-принципов : моногра-  
фия / В. П. Федосов, В. В. Воронин, С. В. Кучерявенко, А. А. Легин,  
А. В. Ломакина, Р. Р. Ибадов ; под редакцией В. П. Федосова ; Юж-  
ный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Изда-  
тельство Южного федерального университета, 2019. – 165 с.

ISBN 978-5-9275-3373-2

Монография содержит результаты разработки программных средств, обес-  
печивающих высокоскоростную передачу данных в условиях канала с переот-  
ражениями для применения в телекоммуникационных системах радиодоступа.  
Представлены разработанные авторами алгоритмы кодирования и декодирова-  
ния на основе сочетания MIMO (*Multiply Input – Multiply Output*) и OFDM  
(*Orthogonal Frequency – Division Multiplexing*). Монография предназначена для  
специалистов по радиосвязи, магистрантов и аспирантов соответствующих  
направлений.

УДК 621.376  
ББК 32.811.3

ISBN 978-5-9275-3373-2

© Южный федеральный университет, 2019  
© Федосов В. П., Воронин В. В., Кучерявенко С. В.,  
Легин А. А., Ломакина А. В., Ибадов Р. Р., 2019  
© Оформление. Макет. Издательство  
Южного федерального университета, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| <b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>  | 1  |
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b>   | 4  |
| <b>1. СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ</b>  | 5  |
| 1.1. Классические системы беспроводной связи  | 5  |
| 1.2. Технология ортогонального частотного мультиплексирования                                       | 6  |
| 1.3. Технология пространственно-временного кодирования  | 9  |
| 1.4. Пропускная способность канала  | 12 |
| 1.5. Системы связи на основе MIMO-OFDM  | 14 |
| 1.6. Оценка канала по методу MMSE   | 15 |
| Выводы  | 17 |
| Список литературы к разделу 1   | 17 |
| <b>2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ 3D-МОДЕЛЬ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА MIMO</b>  | 20 |
| 2.1. Структура антенной системы приемника и передатчика   | 21 |
| 2.2. Влияние эффекта Доплера на замирания в канале  | 22 |
| 2.3. Математическая и геометрическая модель канала связи  | 23 |
| Выводы  | 26 |
| Список литературы к разделу 2   | 26 |
| <b>3. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ КАНАЛА С ПЕРЕОТРАЖЕНИЯМИ</b>            | 28 |
| 3.1. Структурная схема приемопередающей системы связи   | 28 |
| 3.2. Адаптивные системы в беспроводной связи  | 36 |
| 3.3. Адаптивный алгоритм обработки пространственно-временных сигналов в системах беспроводной связи | 38 |
| Выводы  | 41 |
| Список литературы к разделу 3   | 42 |
| <b>4. МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЕ СИСТЕМЫ MIMO</b>  | 44 |
| 4.1. Математическая модель для многопользовательской системы MIMO                                   | 46 |
| 4.2. Пропускная способность канала MIMO в системе Multi-User  | 48 |
| Выводы  | 50 |
| Список литературы к разделу 4   | 50 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>5. АНАЛИЗ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ<br/>ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ВЫХОДЕ КАНАЛА СВЯЗИ .....</b>  | <b>53</b>  |
| 5.1. Методы описания и распознавания текстур .....   | 63         |
| 5.2. Марковские случайные поля .....   | 73         |
| Список литературы к разделу 5 .....  | 76         |
| <b>6. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ОПТИЧЕСКИХ<br/>ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КАНАЛА С ПЕРЕОТРАЖЕНИЯМИ .....</b>  | <b>83</b>  |
| 6.1. Цифровая обработка одномерных и двумерных сигналов<br>в системе первичной обработки: улучшение, шумоподавление,<br>восстановление потерянных областей и реконструкция ..... | 83         |
| 6.2. Цифровая обработка одномерных и двумерных сигналов<br>в системе вторичной обработки: идентификации и преобразования<br>информации, полученной на основе изображений .....   | 99         |
| 6.3. Комплексная обработка оптических изображений и других<br>каналов измерительной информации .....   | 107        |
| 6.4. Распознавание образов в системах технического зрения<br>автономных роботизированных комплексов .....  | 140        |
| Список литературы к разделу 6 .....  | 153        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>  | <b>162</b> |