



经典译丛

WILEY

信息与通信技术



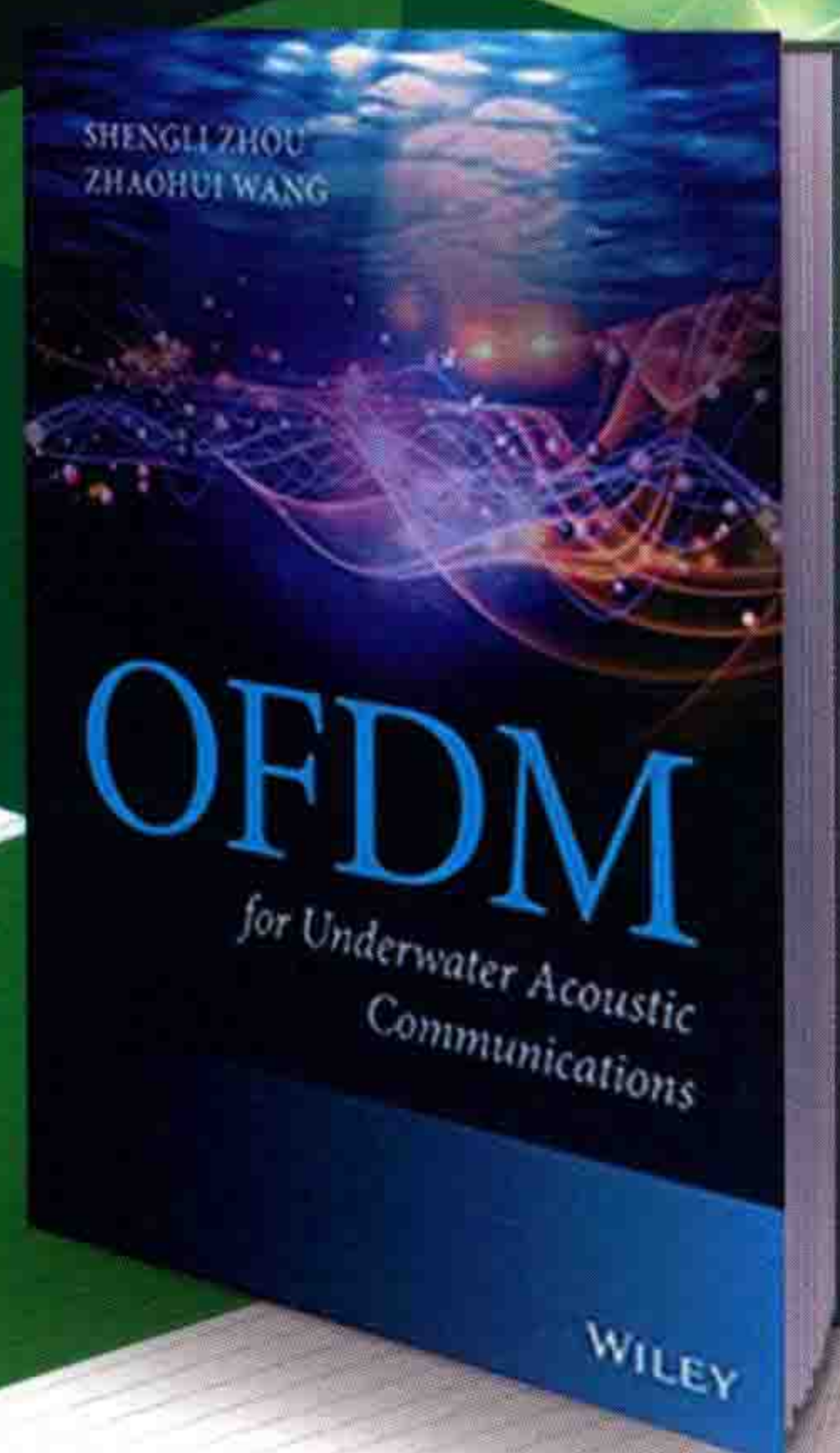
OFDM for Underwater Acoustic Communications

OFDM水声通信

OFDM for Underwater Acoustic Communications

Shengli Zhou (周胜利) 著
Zhaohui Wang (王昭辉)

胡晓毅 任欢 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

非外借

经典译丛·信息与通信技术

OFDM 水声通信

OFDM for Underwater Acoustic Communications

Shengli Zhou (周胜利) 著
Zhaohui Wang (王昭辉)

胡晓毅 任 欢 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以高速 OFDM 水声通信技术为主线,内容涉猎广泛,概念原理阐述清楚,逻辑性强。从 OFDM 水声通信各关键技术的原理阐述到 OFDM 水声通信接收机的设计方法以及 OFDM 水声 MODEM 的研制;从单用户的 MIMO-OFDM 到多用户 MIMO-OFDM 水声通信的设计应用;从 OFDM 的中继传输到 OFDM 网络编码以及水声测距与定位。通过学习本书可以加深对 OFDM 水声通信相关原理及系统设计的理解。

本书可作为水声通信相关专业本科高年级和研究生的教材或参考书,也可供相关专业工程技术人员学习和参考。

OFDM for Underwater Acoustic Communications

ISBN: 978-1-118-45886-0

Shengli Zhou, Zhaohui Wang

Copyright © 2014 by John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文字版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Ltd 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2014-7991

图书在版编目(CIP)数据

OFDM 水声通信 / 周胜利, 王昭辉著; 胡晓毅, 任欢译. —北京: 电子工业出版社, 2018.6

书名原文: OFDM for Underwater Acoustic Communications

ISBN 978-7-121-33704-8

I. ①O… II. ①周… ②王… ③胡… ④任… III. ①水声通信 IV. ①E96

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 029625 号

策划编辑: 张小乐

责任编辑: 张小乐

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20 字数: 512 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254462, zhxl@phei.com.cn。

译者序

水声信道是时变、频变、空变的随机多径信道，水声信道具有窄带宽和高噪声的特性。水声信道被公认为是最困难的无线信道。2001年，美国 EDN 杂志执行总编辑 Bill Schweber 曾经在文中表示：如果你认为在无线链路实现速率为数兆比特/秒的数据通信难度很大的话，那你试试在多变不利的水声信道中实现 2400 b/s 的传输，许多陆上通信的设计方法在水中是无效的。这足见水声信道的复杂性和水声通信设计的困难性。因此，实现在低信噪比下的高可靠、高速率的水声通信是水声科研工作者追求的长期目标。

从 1945 年的第一部真正意义上的水声通信系统——美国海军的水下电话开始，随着半导体集成技术的发展，水声通信也经历了从模拟通信到数字通信的变化历程。在通信体制上，水声通信从最早的抑制载波的单边带幅度调制体制开始，首先经历了跳频扩频、直接序列扩频、多频移频键控以及 Chirp 调制等低速率的通信体制。Milica Stojanovic 提出的二阶锁相环信道跟踪与自适应反馈均衡技术相结合的单载波通信体制，是水声通信从低速率发展到高速率水声通信的一个里程碑。在此以后，伴随着陆上无线通信技术的发展，针对高速水声通信的相关研究越来越成为水声通信研究工作者追求的目标。目前，高速水声通信的研究主要在以下三个方面：a) 对单载波体制下的时间反转技术、频域均衡等技术的研究；b) 对多载波调制下的相关接收处理技术的研究；c) 在多输入多输出技术架构下，对包括分别与单载波调制和多载波调制相结合的相关接收处理算法的研究。

正交频分复用 (OFDM) 技术是一种多载波调制的传输技术，它具有天然的高速率和抗多径干扰的优势，是中近程高速水声通信的主流方案之一。因此，关于 OFDM 水声通信各种处理算法的研究论文也越来越多。但遗憾的是，很少有系统性介绍水声通信系统设计的书籍，而 OFDM 高速水声通信系统设计方面的论著在此之前更是没有。

非常有幸，我于 2013 年以访问学者的身份，来到了美丽的美国康涅狄格大学 (UCONN) 水下传感器网络 (UWSN) 实验室，跟随周胜利教授进行访问学习。也因此有机会较早地接触到此书的原稿。通过阅读学习原稿，发现周老师拟出版的这本书不仅概念清晰，思路清楚，而且从水声信道开始全面地阐述了水声通信系统的设计方法和水声通信系统的性能评估和分析方法。它是我看到的第一本全面系统阐述水声通信的优秀著作。书中许多巧妙的思路方法都充满着作者对 OFDM 水声通信的深入研究。某天，与当时在实验室的徐晓卡研究教授和访学博士张育芝聊天谈及此书时，发现我们对此书的理解有许多共鸣之处，都认为特别有必要将此书翻译成中文，方便国内的研究工作者们学习借鉴。尤其是对本科高年级同学和研究生同学，本书更具有参考研究价值。期望此书能对国内水声通信研究工作的普及发展起到一点推动作用。非常遗憾，由于其他两位实验室同事研究工作繁忙，无缘一起完成翻译工作，我在此衷心地感谢他们为促成此事的相互启发性讨论。在此一并感谢本书作者对中文译稿的定稿所做的审校工作。

本书的翻译工作由胡晓毅和任欢完成。其中，任欢完成第 8 章至第 11 章的翻译工作。其余章节由胡晓毅完成，并由胡晓毅对全书进行了统稿校对工作。在此书出版的整个过程中，由于某些环节和因素的影响，导致出版周期较长，让我也深深感到这个比较小众的水声通信领域的发展不易，也衷心希望有更多更好的水声通信相关的书籍问世。

由于译者的水平有限，难免有错误和不当之处，欢迎读者对译文提出批评指正。

译 者

2018 年 1 月于厦门大学

前 言

水声信道具有诸如时间变化大、传播路径丰富以及自然的宽带等独特性质，水声信道被认为与无线信道有着很大的不同。虽然有非常多数字和无线通信的教材，但许多教材中都根据无线射频信道进行裁剪，采用简化的信道模型以便于表述。按照教材中标准接收机的设计方法，实践者经常会受挫于真实的水声环境中的接收机性能。本书特别以正交频分复用 (OFDM) 的多载波调制技术，致力于呈现并解决水声 (UWA) 通信的挑战。

过去的十年，我们见证了 OFDM 对高数据率无线电通信的巨大影响和变革。它在许多无线通信标准中更是担当主力的角色。例如，Wi-Fi (IEEE 802.11 a/g/n)，WiMAX (IEEE 802.16)，数字音频和视频 (DAB/DVB)，以及第四代蜂窝通信系统。最流行的 OFDM 起源于它可将时域中的长多径信道转变为频域中的多个并行的单抽头信道，这样就大大简化了接收机的设计。这个特性使得 OFDM 对水声信道来说，是一个非常有吸引力的选择。然而，虽然从 20 世纪 90 年代起，OFDM 已经在水声环境中进行了测试试验，但截止到 21 世纪前 10 年中期，水声 OFDM 的可行性尚未用实验数据加以证实。从 21 世纪前 10 年后期开始，在水声这个研究群体的努力下，OFDM 技术的研究才得到了长足的进步。

本书致力于水声信道中的 OFDM 技术，不同的章节重点应对不同的挑战。希望读者具有一定的信号处理和通信的背景知识。对于水声研究群体的读者，本书可以加深对特定的水声系统设计方面的理解。对于水声研究群体外的读者，本书则可以帮助他们了解并欣赏不同领域系统设计的区别。

本书的技术内容主要源于美国康涅狄格大学 (UCONN) 水下传感器网络 (UWSN) 实验室的研究，该研究实验室由崔军红博士和本书的第一作者周胜利共同指导管理。对本书的内容有贡献的实验室过去和现在的人员包括：博士后研究人员 Drs. Jie Huang (黄杰)，Hao Zhou (周浩) 和 Xiaoka Xu (徐晓卡)；毕业的博士生 Drs. Baosheng Li (李宝升)，Christian Berger, Jianzhong Huang (黄建忠)；在读博士 Patrick Carroll, Lei Wan (万磊)，Yi Huang (黄熠)；毕业的硕士生 Sean Mason, Weian Chen (陈伟岸)，Wei Zhou (周伟)；访问学者 Yougan Chen (陈友淦)，Haixin Sun (孙海信)，Yuzhi Zhang (张育芝)，Xiaomei Xu (许肖梅)；作者从与 UWSN 相关的教师合作中获得了很多益处，特别是 Drs. Peter Willett, Junhong Cui (崔军红)，Zhijie Shi (史志杰)，James O'Donnell 和 Thomas Torgersen。作者特别感激 UCONN 的系统团队的同事们，特别是 Drs. Yaakov Bar-Shalom、Peter Luh、Krishna Pattipati 和 Peter Willett，是他们创造了非常优秀的学术研究氛围。

作者要感谢伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 的 Mr. Lee Freitag、Dr. James Preisig 及其团队，海军水下军事中心 (NUWC) 的 Dr. Josko Catipovic 及其团队，他们提供了多次实验机会。从这些实验获得的数据，特别是 SPACE08 实验、MACE10 实验和 AUTECH 网络实验，协助我们进行了接收机的研制并加以验证。Dr. T. C. Yang 提供的实验机会同样有助于促进我们的研究工作。我们要感谢 Dr. Milica Stojanovic 在研究初期的启发式讨论，以及 Dr. Zhengdao Wang (王正道) 经常性的讨论所提出的宝贵意见。

审阅者的反馈也帮助我们提高了本书的写作质量。我们感谢 Drs. Christian Berger, Tolga Duman, Dennis Goeckel, Georgios Giannakis, Geert Leus, Aijun Song(宋爱军), Milica Stojanovic, Zhengdao Wang(王正道), Peter Willett, Chengshan Xiao(肖承山)和 Ms. Xiaoyi Hu(胡晓毅), 他们在短时间内审查了不同的章节。感谢来自出版商的 Mr. Mark Hammond, Ms. Liz Wingett 和 Ms. Sandra Grayson 在本书项目实施中的足够耐心和支持。

本书得到了海军研究办公室(ONR)和国家自然科学基金(NSF)研究计划的资助。我们感谢计划的管理者: 负责管理 YIP 和 PECASE 计划的 ONR 的 Dr. Robert Headrick, 负责管理 NSF 不同计划的 Dr. Scott Midkiff, Dr. David Du, Dr. Zygmunt Haas 和 Dr. Zhi Tian(田智)。ONR 的 Dr. Keith Davidson 在每年的 ONR PI 会议中给予了许多鼓励。康涅狄格大学提供了 NSF 计划相配套的各种经费支持。第一作者感谢联合技术公司(UTC)工程革新副教授基金给予的资助(2008—2011)和 Charles H. Knapp 电子工程副教授基金给予的资助(2012—2013)。

我们导师的培养奠定了作者从事这项计划研究的基础。Dr. Shengli Zhou 感谢他的博士导师 Dr. Georgios B. Giannakis 和他的硕士导师 Dr. Jinkang Zhu(朱近康); Dr. Zhaohui Wang 感谢她的硕士导师 Dr. Huizhi Cai(蔡惠智), 感谢他们在研究生期间的指导。

最后但同样重要的, 我们要感谢我们的家人在整个项目期间的持续支持和鼓励!

Shengli zhou(周胜利)

康涅狄格大学

Zhaohui Wang(王昭辉)

密歇根理工大学

缩 略 语

AF	Amplify and Forward 放大转发
ANC	Analogy Network Coding 模拟网络编码
AoA	Angle of Arrival 到达角
ARQ	Automatic Repeat Request 自动重传请求
AUTEC	Atlantic Undersea Test and Evaluation Center 大西洋水下试验和评估中心
AUV	Autonomous Underwater Vehicle 自治水下航行器
BCJR	The Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv Algorithm BCJR 算法
BICM	Bit Interleaved Coded Modulation 比特交织编码调制
BP	Basis Pursuit 基追踪
BPSK	Binary Phase-Shift Keying 二进制相移键控
BER	Bit Error Rate 误码率 ^①
BLER	Block Error Rate 块错误率
CC	Convolutional Code 卷积码
CCDF	Complementary Cumulative Distribution Function 互补累积分布函数
CCI	Cochannel Interference 信道间干扰
CDF	Cumulative Distribution Function 累积分布函数
CDMA	Coded-Division Multiple Access 码分多址
CF	Compress and Forward 压缩转发
CFO	Carrier Frequency Offset 载波频率偏移
CP	Cyclic Prefix 循环前缀
CRLB	Cramer-Rao Lower Bound 克拉美罗下界
CS	Compressive Sensing 压缩感知
CSI	Channel State Information 信道状态信息
CZT	Chirp z -Transform Chirp z 变换
DBC	Dynamic Block-Cycling 动态块循环
DCC	Dynamic Coded Cooperation 动态编码协作
DF	Decode and Forward 译码转发
DFE	Decision-Feedback Equalization 判决反馈均衡
DFT	Discrete Fourier Transform 离散傅里叶变换
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum 直接序列扩展频谱
FDM	Frequency Division Multiplexing 频分复用
FFT	Fast Fourier Transform 快速傅里叶变换
FH	Frequency Hopping 跳频

^① 本书所讨论的均为二进制情况下的误码率，因此用误码率代替误比特率。

FG	Factor Graph 因子图
FSK	Frequency Shift Keying 频移键控
GIB	GPS Intelligent Buoy GPS 智能浮标
GLRT	Generalized Log-Likelihood Test 通用对数似然比测试
GMP	Gaussian Message Passing 高斯消息传递
GPS	Globe Positioning System 全球定位系统
HFM	Hyperbolic-Frequency Modulation 双曲调频
IBI	Interblock Interference 块间干扰
ICI	Intercarrier Interference 载波间干扰
i.i.d.	Independent and Identically Distributed 独立同分布
IMM	Interacting Multiple Model 交互式多模
ISI	Intersymbol Interference 符号间干扰
LASSO	Least Absolute Shrinkage and Selection Operator 最小绝对收缩与选择算子
LBL	Long Baseline 长基线
LDPC	Low Density Parity Check Code 低密度奇偶校验码
LFM	Linear-Frequency Modulation 线性频率调制
LLR	Log-Likelihood Ratio 对数似然比
LLRV	Log-Likelihood Ratio Vector 对数似然比矢量
LMMSE	Linear Minimum Mean-Square Error 线性最小均方误差
LPF	Low Bandpass Filtering 低通滤波器
LPM	Linear-Period Modulation 线性周期调制
LS	Least Squares 最小均方
MAC	Medium-Access Control 媒体接入控制
MACE10	Mobile Acoustic Communication Experiment in 2010 2010年移动水声通信实验
MAP	Maximum A Posteriori Probability 最大后验概率
MCMC	Markov Chain Monte Carlo 马尔可夫链蒙特卡罗
MIMO	Multi-Input Multi-Output 多输入多输出
ML	Maximum Likelihood 最大似然
MP	Matching Pursuit 匹配追踪
MSE	Mean Squared Error 均方误差
MMSE	Minimum Mean Squared Error 最小均方误差
MRC	Maximum Ratio Combining 最大比合并
MUD	Multiuser Detection 多用户检测
MUI	Multiuser Interference 多用户干扰
NC	Network Coding 网络编码
NCM	Nonbinary Coded Modulation 多进制编码调制
NLNC	Network-Layer Network Coding 网络层网络编码
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing 正交频分复用
OMP	Orthogonal Matching Pursuit 正交匹配追踪

PAM	Pulse Amplitude Modulation	脉冲幅度调制
PAPR	Peak-To-Average-Power Ratio	峰均功率比
PDA	Probabilistic Data Association	概率数据关联
PER	Packet Error Rate	误包率
PLNC	Physical-Layer Network Coding	物理层网络编码
PSNR	Pilot Signal-To-Noise Ratio	前导信噪比
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QC	Quasi-Cyclic	准循环
QMF	Quantize, Map and Forward	量化, 映射和转发
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交相移键控
RIP	Restricted Isometry Property	约束等距性
RMSE	Root Mean-Squared Error	根均方误差
S2C	Sweep-Spread Carrier	扫频扩展载波
SBL	Short Baseline	短基线
SDA	Sphere Decoding Algorithm	球译码算法
SIMO	Single-Input Multi-Output	单输入多输出
SINR	Signal-to-Interference-and-Noise Ratio	信干噪比
SIR	Signal-to-Interference Ratio	信号干扰比
SISO	Single-Input Single-Output	单输入单输出
SNR	Signal-to-Noise Ratio	信噪比
SOFAR	Sound Fixing and Ranging	声呐定位装置
SONAR	Sound Navigation and Ranging	声波导航与测距
SPA	Sum Product Algorithm	和积算法
SPACE08	Surface Processes and Acoustic Communication Experiment in 2008	2008 海面过程与声通信实验
SPRT	Sequential Probability Ratio Test	序贯概率比检验
SUD	Single-User Detection	单用户检测
TCM	Trellis Coded Modulation	网格编码调制
TDOA	Time Difference of Arrival	到达时间差
TVR	Transmitter Voltage Response	发射电压响应
USBL	Ultra-Short Baseline	超短基线
UUV	Unmanned Underwater Vehicle	无人水下航行器
UWA	Underwater Acoustic	水声信道
VA	Viterbi Algorithm	维特比算法
ZF	Zero Forcing	迫零
ZP	Zero Padding	零后缀

常用符号的定义

Scalars 标量

K	Number of subcarriers in one OFDM symbol	OFDM 符号的子载波数
B	Frequency bandwidth of one OFDM symbol	OFDM 符号的频带宽度
Δf	Subcarrier spacing in one OFDM symbol, $:= B/K$	OFDM 符号的子载波间隔
T	Time-duration of one OFDM symbol, $:= 1/\Delta f$	OFDM 符号的时间间隔
T_g	Time-duration of guard interval for one OFDM symbol	OFDM 符号的时间保护间隔
T_{bl}	Time-duration of one OFDM block, $:= T+T_g$	OFDM 块的时间间隔
f_c	Center frequency of communication system	通信系统的中心频率
f_k	Frequency of the k th subcarrier, $:= f_c + k/T$	第 k 个子载波的频率
S_N	The set of null subcarriers in one OFDM symbol	OFDM 符号的空子载波集
S_P	The set of pilot subcarriers in one OFDM symbol	OFDM 符号的导频子载波集
S_D	The set of data subcarriers in one OFDM symbol	OFDM 符号的数据子载波集
S_A	The set of active subcarriers in one OFDM symbol, $:= S_P \cup S_D$	OFDM 符号的活跃子载波集
$h(t; \tau)$	Time-varying channel impulse response	时变信道冲激响应
$A_p(t)$	Time-varying amplitude of the p^{th} path	第 p 径的时变幅度
A_p	Time-invariant amplitude of the p^{th} path	第 p 径的时不变幅度
$\tau_p(t)$	Time-varying delay of the p^{th} path	第 p 径的时变时延
τ_p	Initial delay of the p^{th} path	第 p 径的初始时延
a_p	Doppler rate of the p^{th} path	第 p 径的多普勒率扩展因子
N_{pa}	Number of paths in the channel	信道的路径数目
a	The main Doppler scaling factor in the UWA channel	水声信道的主要多普勒扩展因子
ϵ	The residual Doppler shift after removing the main Doppler effect	消除主要多普勒效应后的残余多普勒频移
ξ_p	The equivalent amplitude of the p^{th} path in the baseband	基带的第 p 径的等效幅度
$\bar{\tau}_p$	The equivalent scaled delay of the p^{th} path in the baseband	基带的第 p 径的等效扩展时延
b_p	The equivalent residual Doppler rate of the p^{th} path in the baseband	基带的第 p 径的等效残余多普勒扩展因子
D	ICI depth	ICI 深度

$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	Real Gaussian distribution with mean μ and variance σ^2 均值为 μ 、方差为 σ^2 的实高斯分布
$\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$	Circularly symmetric complex Gaussian distribution with zero mean and variance σ^2 均值为零、方差为 σ^2 的循环对称的复高斯分布
$\tilde{x}(t)$	The waveform in passband 通带波形
$x(t)$	The waveform in baseband; Conversion between $\tilde{x}(t)$ and $x(t)$: 基带波形; $\tilde{x}(t)$ 和 $x(t)$ 的转换 $\tilde{x}(t) = 2\Re\{x(t)e^{j2\pi f_c t}\}$ $x(t) = \text{LPF}[\tilde{x}(t)e^{j2\pi f_c t}]$

Vectors and Matrices 矢量与矩阵

\mathbf{z}	Measurement vector formed by frequency samples at all the OFDM subcarriers 所有 OFDM 子载波上的由频域采样值所构成的测量矢量
\mathbf{s}	Transmitted symbol vector formed by symbols at all the OFDM subcarriers 所有 OFDM 子载波上的由符号构成的发送符号矢量
\mathbf{w}	Ambient noise vector formed by the ambient noise at all the OFDM subcarriers 所有 OFDM 子载波上的由环境噪声构成的环境噪声矢量
$\boldsymbol{\eta}$	Equivalent noise vector formed by the equivalent noise at all the OFDM Subcarriers 所有 OFDM 子载波上的由等效噪声构成的等效噪声矢量
\mathbf{H}	Channel mixing matrix 信道混合矩阵
$\mathcal{CN}(0, \boldsymbol{\Sigma})$	Circularly symmetric complex Gaussian random vector with zero mean and covariance matrix $\boldsymbol{\Sigma}$ 零均值和自协方差 $\boldsymbol{\Sigma}$ 的循环对称复高斯随机矢量

Operations 操作

\propto	Equality of functions up to a scaling factor 标量测量因子的等效函数
$ S $	Cardinality of set S S 集的基数
$[\mathbf{a}]_m$	The m^{th} entry of vector \mathbf{a} 矢量 \mathbf{a} 的第 m 项
$[\mathbf{A}]_{m,k}$	The (m, k) th entry of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的第 (m, k) 项
$\{\mathbf{a}\}_{\ell=i}^j$	A set formed by elements $\{[\mathbf{a}]_i, [\mathbf{a}]_{i+1}, \dots, [\mathbf{a}]_j\}$ 由 $\{[\mathbf{a}]_i, [\mathbf{a}]_{i+1}, \dots, [\mathbf{a}]_j\}$ 元素组成的集合 \mathbf{A}
\hat{a}	The estimate of scale a 标量 a 的估计
$\hat{\mathbf{a}}$	The estimate of vector \mathbf{a} 矢量 \mathbf{a} 的估计
$\hat{\mathbf{A}}$	The estimate of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的估计
\mathbf{A}^T	The transpose of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的转置
\mathbf{A}^H	The complex conjugate transpose of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的复共轭转置
\mathbf{A}^\dagger	The pseudo-inverse of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的伪逆矩阵

$\text{tr}(\mathbf{A})$	Trace of matrix \mathbf{A} 矩阵 \mathbf{A} 的迹
$\text{Pr}\{A\}$	Probability of an event A 事件 A 的概率
$\mathbb{E}(X)$	Expectation of random variable X 随机变量 X 的期望值
$\mathbb{E}(\mathbf{x})$	Expectation of random vector \mathbf{x} 随机矢量 \mathbf{x} 的期望值
$\text{Cov}(X, Y)$	Covariance of two random variables 两个随机变量的协方差
$\text{Cov}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$	Covariance matrix of two random vectors 两个随机矢量的协方差矩阵
$\Re\{x\}$	Real part of a complex number x 复数 x 的实部
$\Im\{x\}$	Imaginary part of a complex number x 复数 x 的虚部

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	水声的早期探索	1
1.1.2	水声通信媒介	1
1.1.3	水下系统和网络	2
1.2	水声(UWA)信道的特点	2
1.2.1	声速	2
1.2.2	传播损失	4
1.2.3	时变多径	6
1.2.4	声传播模型	7
1.2.5	环境噪声和外部干扰	8
1.3	通带信道的输入和输出关系	9
1.3.1	各径自有多普勒扩展的线性时变信道	9
1.3.2	具有共同多普勒扩展的线性时变信道	10
1.3.3	线性时不变信道	11
1.3.4	幅度和时延变化的线性时变信道	11
1.3.5	依频率衰减的线性时变信道	11
1.4	水声通信中的调制技术	12
1.4.1	跳频 FSK	12
1.4.2	直接序列扩展频谱	12
1.4.3	单载波调制	13
1.4.4	扫频(S ² C)载波调制	13
1.4.5	多载波调制	14
1.4.6	多输入多输出技术	14
1.4.7	水声通信的近期发展	15
1.5	本书的组织结构	15
第 2 章	OFDM 基本知识	17
2.1	零后缀的 OFDM	17
2.1.1	发射信号	17
2.1.2	接收机处理	19
2.2	循环前缀的 OFDM	20
2.2.1	发射信号	20

2.2.2	接收机处理	21
2.3	OFDM 相关的问题	21
2.3.1	ZP-OFDM 与 CP-OFDM	21
2.3.2	峰值平均功率比	22
2.3.3	功率谱和带宽	22
2.3.4	子载波分配	22
2.3.5	总的速率	23
2.3.6	设计指南	23
2.4	离散傅里叶变换的实现	23
2.5	OFDM 的挑战和补救方法	24
2.5.1	分集合并和信道编码的益处	25
2.6	MIMO-OFDM	27
2.7	文献注记	29
第 3 章	多进制 LDPC 编码的 OFDM	30
3.1	OFDM 的信道编码	30
3.1.1	信道编码	30
3.1.2	编码调制	31
3.1.3	编码的 OFDM	32
3.2	多进制 LDPC 码	33
3.2.1	多进制的规则循环码	34
3.2.2	多进制非规则 LDPC 码	35
3.3	编码	36
3.4	译码	37
3.4.1	初始化	38
3.4.2	变量节点到校验节点更新	39
3.4.3	校验节点到变量节点更新	39
3.4.4	初始判决和译码输出	40
3.5	码设计	41
3.5.1	规则循环码的设计	41
3.5.2	非规则 LDPC 码的设计	42
3.5.3	准循环的多进制 LDPC 码	43
3.6	编码的 OFDM 的仿真结果	45
3.7	文献注记	47
第 4 章	PAPR 控制	48
4.1	PAPR 的比较	48
4.2	PAPR 的减小	50
4.2.1	限幅	50
4.2.2	选择性映射	51

4.2.3	载波峰值抑制	52
4.3	文献注记	53
第 5 章	接收机综述和预处理	54
5.1	OFDM 接收机综述	54
5.2	接收机预处理	55
5.2.1	接收机的预处理	55
5.2.2	数字实现	56
5.2.3	频域过采样	59
5.3	频域的输入/输出关系	59
5.3.1	单输入单输出信道	59
5.3.2	单输入多输出信道	61
5.3.3	多输入多输出信道	61
5.3.4	信道矩阵结构	62
5.4	OFDM 接收机的分类	62
5.4.1	ICI-忽略的接收机	63
5.4.2	ICI-感知的接收机	64
5.4.3	逐块处理	65
5.4.4	块间处理	65
5.4.5	讨论	65
5.5	仿真信道的接收机性能界	65
5.5.1	仿真水声信道	66
5.5.2	时变信道下的 ICI 影响	66
5.5.3	SISO 信道的中断性能	67
5.6	扩展到 CP-OFDM	68
5.6.1	接收机预处理	68
5.6.2	频域的输入/输出关系	68
5.7	文献注记	69
第 6 章	检测, 同步和多普勒扩展估计	70
6.1	基于互相关的方法	71
6.1.1	基于互相关的检测	71
6.1.2	基于互相关的同步和多普勒扩展估计	74
6.2	CP-OFDM 的检测、同步和多普勒扩展的估计	76
6.2.1	具有自重复的 CP-OFDM 前导码	76
6.2.2	基于自相关的检测、同步和多普勒扩展估计	77
6.2.3	实现	78
6.3	一个 ZP-OFDM 块的同步和多普勒扩展估计	79
6.3.1	基于空子载波的盲估计	80
6.3.2	导频辅助的估计	80

6.3.3	基于判决辅助的估计	80
6.4	多普勒扩展估计的仿真结果	81
6.4.1	CP-OFDM 的 RMSE 性能	81
6.4.2	ZP-OFDM 的 RMSE 性能	82
6.4.3	CP-OFDM 和 ZP-OFDM 的盲估计方法的比较	83
6.5	实用系统的设计实例	84
6.6	残余多普勒频移估计	85
6.6.1	重采样后的系统模型	85
6.6.2	残余多普勒频移补偿的影响	86
6.6.3	两种残余多普勒频移估计方法	88
6.6.4	仿真结果	88
6.7	文献注记	90
第 7 章	信道和噪声方差估计	91
7.1	ICI-忽略的信道估计问题描述	91
7.1.1	输入/输出关系	91
7.1.2	基于字典的描述	92
7.2	ICI-忽略的稀疏信道感知	93
7.2.1	字典分辨率与信道稀疏性	94
7.2.2	稀疏因子	95
7.2.3	导频数目与路径数目	95
7.3	ICI-感知的稀疏信道感知	96
7.3.1	问题描述	96
7.3.2	ICI-感知的信道感知	97
7.3.3	导频子载波的分布	98
7.3.4	数据符号的影响	98
7.4	稀疏恢复算法	99
7.4.1	匹配追踪	99
7.4.2	ℓ_1 范数最小化	99
7.4.3	通过 FFT 实现矩阵向量乘法	101
7.4.4	计算复杂度	102
7.5	扩展到多输入信道	102
7.5.1	ICI-忽略的稀疏信道感知	102
7.5.2	ICI-感知的稀疏信道感知	103
7.6	噪声方差估计	104
7.7	噪声预白化	105
7.7.1	噪声谱估计	105
7.7.2	频域白化	106
7.8	文献注记	106