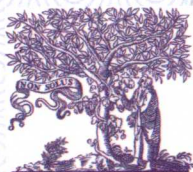




装备科技译著出版基金



ELSEVIER
爱思唯尔

【奥地利】 Franz Hlawatsch
Gerald Matz

编

窦高奇 郭福亮
李聪颖 高俊

等译

快时变信道下 的无线通信

Wireless Communications Over Rapidly Time-Varying Channels



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

号 753-1055 军 / 学图 51 登同合外译著

编著 (1977) 自科部在并国

编著 (1977) 自科部在并国

编著 (1977) 自科部在并国

编著 (1977) 自科部在并国

快时变信道下的无线通信

Wireless Communications Over Rapidly
Time-Varying Channels

[奥地利] Franz Hlawatsch Gerald Matz 编

窦高奇 郭福亮 李聪颖 高



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2014-127 号

图书在版编目 (CIP) 数据

快时变信道下的无线通信/(奥)霍瓦茨 (Hlawatsch, F.), (奥)马 (Matz, G.) 编; 窦高奇等译.

—北京: 国防工业出版社, 2015.6

书名原文: Wireless Communications Over Rapidly Time-Varying Channels

ISBN 978-7-118-10007-5

I. ①快… II. ①霍… ②马… ③窦… III. ①无线电通信 IV. ①TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 132288 号

Wireless Communications Over Rapidly Time-Varying Channels

Franz Hlawatsch, Gerald Matz

ISBN:978-0-12-374483-8

Copyright© 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier Limited and National Defense Industry Press.

Copyright 2015 by Elsevier Limited. All rights reserved.

Published in China by National Defense Industry Press under special arrangement with Elsevier Limited. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予国防工业出版社在中国大陆地区 (不包括中国香港、澳门以及台湾地区) 出版与发行。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受民法及刑法法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 22¼ 字数 505 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 99.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

译者序

无线通信是通信产业发展最快的分支，特别是近十余年的蓬勃发展，使之成为当前最重要的产业之一。随着移动通信与宽带无线接入技术的融合，人们在感受无线通信带来的方便快捷的同时也对其服务质量提出更高的要求，特别是在移动性方面。例如，在高速移动车载环境下，移动终端与基站间高速相对运动造成信道的时变衰落，但现有的移动通信技术无法满足 350km/h 以上高速列车宽带移动通信的需求。对于高速（200~500km/h）场景下，以旅客高速上网、海量视频监控和传感器数据传输为主的快时变信道下的无线通信是高速铁路通信面临的难题。目前，虽然已有很多无线接入系统都提供高速率服务，如 IEEE 802.16, IEEE 802.11n, HSPA, LTE-A, WiMAX 等，但这些系统主要应用于静态或慢变场景，尚不能满足高移动性场景下的服务质量需求；在军事通信领域，多跳协作传输信道、移动水声信道等都是典型的快时变信道。然而，目前快时变信道下的相关研究成果都集中在近年来的国际学术期刊和会议，国内相关研究报道相对较少，还没有一本理论透彻、技术新颖、内容系统全面的关于快时变信道无线通信的专著。《Wireless Communications Over Rapidly Time-Varying Channels》一书主要针对当前高移动环境下宽带无线通信的应用需求，从系统理论和信息理论角度解释了双色散信道特性，描述了快时变信道下面临的各种挑战和解决方案。全书共 9 章，内容涵盖了时变信道下无线通信的最新理论和算法。每一章都是由国外相关领域的顶级专家和知名学者编写的，是反映无线通信领域的一部最新的经典著作，在学科上具有重要的理论和工程应用价值。

本书可以作为通信工程和电子信息类相关专业高年级研究生的教学参考书，也可供相关专业的教师、科研人员以及无线通信工程师学习参考。

本书由窦高奇、郭福亮、李聪颖、李作文、高俊等翻译，参加本书翻译和初校工作的还有陈飞、邓冉、张龙、文申平、李亮、周思同、何宪文、李子龙等，李美红同志在文字录入和版式设计方面做了大量的工作，在此表示诚挚谢意！

由于译者水平有限，加之时间仓促，译文中难免有不妥乃至错误之处，敬请读者不吝指正。

译者

2015 年 5 月

前言

无线通信已成为一个受到科学和经济密切关注的领域。最近的成功事例包括 2G 和 3G 蜂窝语音和数据服务（如 GSM 和 UMTS）、无线局域网（WiFi/IEEE 802.11x）、无线宽带接入（WiMAX/IEEE 802.16x）和无线数字广播系统（DVB, DAB, DRM）。在物理层，传输设计通常假设信道在数据块传输期间保持恒定。然而，研究者和系统设计师越来越多的将注意力转向信道在数据块传输期间变化的情况。除多径传播造成时间扩展外，多普勒效应会造成快时变信道表征的频率色散，此时，信道通常称为双色散的。

早期的时变和频率色散信道首先针对的是电离层和对流层通信和射电天文学。快时变信道的理论基础是由 20 世纪 60 年代的 Bello, Gallager, Kailath, Kennedy 及其他学者创立的。最近，快时变信道已经在新的应用领域变得越来越重要，具有潜在的经济价值和社会影响。

- 用户移动性是多普勒的一个重要来源，它已经成为当前蜂窝和宽带接入系统重要的影响因素，一个极端的例子就是高速铁路下的无线接入链路。同样，在高速车载和车与基站之间通信面临信道的快速变化。移动通信变得越来越重要。

- 在先进的无线网络中，节点间通过分布协作方式获取空间分集增益，一个例子是 3GPP 长期演进的基站协作选择（也称为网络 MIMO 或协作多点传输），系统中不同节点间的频偏累积，加上移动引入的频率偏移，导致信道呈现快速变化。

- 由于声音在水中传播速度远小于光速，在水下声通信中的相对多普勒偏移要远大于陆地无线通信系统。此外，较小声波的传播速度会导致较大的传播时延。因此，水声信道是典型的双色散信道。

虽然多普勒移位引入的信道快速变化提供了额外的维数来支持附加的增益，同时，双色散信道也对系统设计提出更大的挑战，必须采取先进的方法来克服信道的不利影响，获取附加增益。因此，理解双色散信道的基本特性和相应的设计范例将是未来无线领域必备的技能。

本书介绍了双色散信道的系统理论和信息理论基础，描述了当前算法和系统设计方法，并综述和讨论了该领域当前的发展和面临的挑战，有助于学者和工程师了解未来无线通信技术。本书由顶级专家牵头，每一章都讲述了快时变信道下无线通信理论和方法各个重要方面。本书对无线收发机设计以及 Turbo 迭代检测、多载波（OFDM）调制和多天线（MIMO）处理等最新技术都进行了专门讲述。

在前言和第 1 章，我们讨论了双色散信道的特性和数学描述，详细内容包括信道的传播效应、系统理论方面、随机信道特性、参数化信道模型和测量原理。

第 2 章由 G. Durisi, V. Morgenshtern, H. Bölcskei, U. Schuster & S. Shamai 编写，主要从信息论角度讨论了随机时变信道，包括 MIMO 信道。本章侧重叙述宽带和高信噪比下

的非相干信道容量（即未知信道状态下的信道容量）。

第3章由 E. Viterbo 和 Y. Hong 编写，讲述了快衰落信道下利用代数理论和点阵理论进行信道码设计。对作为恢复发送码字的有效方法的球形译码器进行了讨论。

第4章由 G. Leus, Z. Tang & P. Banelli 编写，主要讨论了快时变信道下单载波和多载波系统的信道估计问题，采用建立在信道基扩展模型和专用导频（训练）符号基础上的块传输方法。

第5章是对第4章时变信道估计下训练序列设计的补充，由 M. Dong, B. M. Sadler & L. Tong 编写。主要研究了各种系统配制和性能准则下导频符号的数目、位置和功率的最优化问题。

第6章由 P. Schniter, S. J. Hwang, S. Das & A. P. Kannu 给出了双色散信道下的均衡技术。同时讨论了相干和非相干检测，采用的方法有线性和搜索树法、迭代法和联合检测和估计方案。

第7章由 L. Rugini, P. Banelli & G. Leus 编写，主要研究了时变信道下的正交频分复用（OFDM）传输。本章讨论了子载波干扰均衡技术和信道估计技术，同时还涉及现有标准中与此有关的内容。

第8章由 C. Dumard, J. Jaldén & T. Zemen 编写，考虑了基于多天线的多用户系统和多载波 CMDA 发送模式。利用 Turbo 迭代接收技术来进行时变信道估计、多用户分离和译码，由于采用 Krylov 子空间和球形译码技术，从而降低了复杂度。

第9章由 A. Papandreou-Suppappola, C. Ioana & J. J. Zhang 编写，讨论了采用比多普勒频移更合适的多普勒尺度来描述宽带信道，并以水下声通信系统为例说明高级接收机设计时涉及的相关理论。

我们要感谢所有对本书做出贡献的人，特别感谢每一章作者的意见和辛勤劳动以及为书中预定义的统一符号作出的努力。我们要感谢 Elsevier 的 Tim Pitts 和我们来编辑此书。Tim 和他的同事——Melanie Benson, Susan Li, Melissa Read & Naomi Robertson 在本书成稿阶段提供了有价值的帮助。最后，我们感谢奥地利科学基金等的支持。

Franz Hlawatsch

Gerald Matz

本书符号

基本标记

$\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{Z}$	实数, 复数, 整数
j	$\sqrt{-1}$
x^*	复共轭
z^{-1}	单位延迟
$\frac{d}{dt}x(t), x'(t)$	微分/导数
$\langle x, y \rangle$	内积
$\ x\ = \sqrt{\langle x, x \rangle}$	范数
$E_x \ x\ ^2$	能量
$(x * y)(t)$	连续时间卷积
$(x * y)[n]$	离散时间卷积
$\text{Re}\{\cdot\}, \text{Im}\{\cdot\}$	实部, 虚部
$L^2(\mathbb{R})$	$\mathbb{R}$ 的平方可积函数空间
$l^2(\mathbb{Z})$	$\mathbb{Z}$ 的平方可和函数空间
$\triangle(\underline{\text{def}})$	定义
$\lceil x \rceil$	最小不小于 x 的整数
$\lfloor x \rfloor$	最大不大于 x 的整数

基本符号

t	持续时间
f	频率(Hz)
τ	连续时间延迟
ν	多普勒频率(Hz)
α	连续时间尺度参数
n	离散时间
m	离散时间延迟
θ	归一化频率
l	离散频率
ξ	归一化多普勒频率

d	离散多普勒频率
k	离散尺度参数
$\Delta t, \Delta n$ 等	滞后/差异
$x(t)$	连续时间信号
$x[n]$	离散时间信号
$X(f)$	连续时间傅里叶变换
$X(\theta)$	离散时间傅里叶变换
$X(l)$	离散傅里叶变换(DFT)
$X(z)$	z 变换
f_s, T_s	采样频率/周期
$s(t), s[n]$	发射信号
$w(t), w[n]$	信道白噪声
$r(t), r[n]$	接收信号
$g(t), \gamma(t)$	发射/接收脉冲
$b[i]$	信息比特
$c[j]$	编码比特
$L_c[j]$	对数似然比
$a[k], a[k, l]$	传输符号
$y[k], y[k, l]$	解调后的符号
$z[k], z[k, l]$	解调后的噪声
$p[k], p[k, l]$	导频符号

发射端和信道参数

T_0, N	块长度
B	发送带宽 (Hz)
f_c	载波频率 (Hz)
T	符号持续时间
R	符号速率
F	副载波频率间隔
T_b	比特持续周期
R_b	比特速率
Π	交织
k	符号时间指数
l	副载波频率指数
$\mathcal{A}$	符号集
N_a	符号集的大小 (基数)
$\mathcal{P}$	导频位置集 k 或 (k, l)
N_p	导频符号的数量

K	发送的符号数
L	子载波的数量
N_g	保护间隔长度
L_{CP}	循环前缀长度
$M_T M_R$	发送/接收天线数量
U	用户数量
ρ	信噪比
I	基扩展模型阶数
$\tau_{\max}, M$	最大延迟(信道长度)
$v_{\max}, D$	最大多普勒频率
A_s	多普勒尺度扩展
T_c	相干时间
F_c	相干带宽
T_s	平稳时间
F_s	平稳带宽

信道和信号表达式

H	信道算子
$h(t, \tau), h[n, m]$	时变脉冲响应
$H(f, \nu), H(l, d)$	频域脉冲响应
$L_H(t, f), L_H(n, l)$	(时频/时变)传输函数
$S_H(\tau, \nu), S_H(m, d)$	(多普勒延迟)扩展函数
$F_H(\tau, \alpha), F_H(m, k)$	带宽扩展函数
$C_H(\tau, \nu), C_H(m, d)$	散射函数
$B_H(\tau, \alpha), B_H(m, k)$	带宽散射函数
$R_H(\Delta t, \Delta f), R_H(\Delta n, \Delta l)$	时频相关函数
$A_x(\Delta t, \Delta f)$	模糊函数
$A_{xy}(\Delta t, \Delta f)$	互模糊函数

特殊函数和信号

$\ln(\cdot)$	自然对数
$\log_{10}(\cdot), \lg(\cdot)$	底为 10 的对数
$\log_2(\cdot)$	底为 2 的对数
$e^t, \exp(t)$	指数函数
$e^{j2\pi ft}$	复正弦
$\sin, \cos, \tan, \cot$	三角函数
$\sinh, \cosh, \tanh, \coth$	双曲函数

$u(t), u[n]$	单位阶跃函数
$1_{\mathcal{A}}(t), 1_{\mathcal{A}}[n]$	指示函数
$\delta(t)$	狄拉克冲激函数
$\delta[n]$	单位采样
δ_{ij}	delta 克罗内克函数
$\text{sign}(\cdot)$	符号函数
$\text{sinc}(t) = \frac{\sin(t)}{t}$	sinc 函数

矢量、矩阵及相关运算

$\mathbf{x}$	(列) 矢量
$x_i, [\mathbf{x}]_i$	矢量 $\mathbf{x}$ 的第 i 个元素
$\ \mathbf{x}\ $	$\mathbf{x}$ 的范数
$\ \mathbf{x}\ _w$	$\mathbf{x}$ 范数的重量
$A, (a_{ij})$	矩阵
$a_{ij}, [A]_{ij}$	矩阵 A 的元素
$\det\{A\}$	矩阵 A 的行列式
$\text{tr}\{A\}$	矩阵 A 的迹
$\dim\{\mathbf{x}\}$	维数
A^{-1}	矩阵 A 的逆
$A^\#$	伪逆
$\mathbf{x}^\text{T}, A^\text{T}$	转置
$\mathbf{x}^\text{H}, A^\text{H}$	艾尔米特转置
I	单位矩阵
W	DFT 矩阵
$U\Sigma V^\text{H}$	奇异值分解
$U\Lambda U^\text{H}$	特征值分解
H	线性算子
H^{-1}	矩阵 H 的逆
H^*	伴随矩阵
$H^\#$	伪逆
I	检验算子

概率、随机变量和随机过程

$\Pr\{\mathcal{E}\}$	随机事件 E 的可能性
$f(x)$	概率密度函数 (pdf)
$p(x)$	概率分布函数 (pmf)
$f(x y), p(x y)$	条件概率/分布

$F(x)$	累积分布函数
$E\{\}$	期望
$\phi_x(s)$	特征函数
$\mu_x, \mu_x, \mu_x(t), \mu_x[n]$	均值(矢量, 矢量)
$\sigma_x^2 = \text{var}\{x\}$	方差
$C_x(t_1, t_2), C_x[n_1, n_2]$	协方差函数
$C_{xy}(t_1, t_2), C_{xy}[n_1, n_2]$	互协方差函数
$R_x(t_1, t_2), R_x[n_1, n_2]$	相关函数
$R_{xy}(t_1, t_2), R_{xy}[n_1, n_2]$	互相关函数
C_x, C_{xy}	(互)协方差矩阵
R_x, R_{xy}	(互)相关矩阵
$c_x(\Delta t), c_x[\Delta n]$	自协方差 (平稳的情况下)
$c_{xy}(\Delta t), c_{xy}[\Delta n]$	互协方差(平稳的情况下)
$r_x(\Delta t), r_x[\Delta n]$	自相关(平稳的情况下)
$r_{xy}(\Delta t), r_{xy}[\Delta n]$	互相关(平稳的情况下)
$P_x[f], P_x[\theta], P_x[l]$	功率谱密度
$P_{xy}[f], P_{xy}[\theta], P_{xy}[l]$	互功率谱密度
$\hat{a}$	a 的估计

本书缩略语

2D	二维
3G	第三代
4G	第四代
AoA	入射角
AoD	出射角
APP	后验概率
AR	自回归
ARMA	自回归滑动平均
AUV	无人潜航器
AWGN	加性白高斯噪声
BCJR	Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv
BEM	基扩展模型
BER	比特错误率
BLUE	最佳线性无偏估计
BPSK	二进制相移键控
CCE	临界采样复指数
CCF	信道相关函数
CDMA	码分多址
CE	复指数
CE-BEM	复指数—基扩展模型
CFO	载波频率偏移
CIR	信道脉冲响应
CM	常数
CP	循环前缀
CP-OFDM	循环前缀的正交频分复用
CP-SCM	循环前缀的单载波调制
CRB	Cramér-Rao 界
CS	临界采样
CSI	信道状态信息
DAB	数字音频广播
DFE	判决反馈均衡
DFT	离散傅里叶变换

DKL-BEM	离散 Karhunen-Loève BEM
DPS	离散扁长椭圆
DPS-BEM	离散扁长椭圆 BEM
DPSS	离散扁长椭圆序列
DSSS	直接序列扩频
DVB	数字视频广播
EFDOM	频域等效 OFDM 模型
EM	最大期望
EMB	贝叶斯 EM
EXT	外概率
FDE	频域均衡
FDKD	频域克罗内克函数
FIR	有限脉冲响应
FM	频率调制
FT	傅里叶变换
GLRT	广义似然比检验
GSM	全球移动通信系统
IAI	天线间干扰
IBI	阵间干扰
ICI	载波间干扰
i.i.d.	独立同分布
ISI	码间干扰
JPG	联合高斯
KF	卡尔曼滤波
LLR	对数似然比
LMMSE	线性最小均方误差
LS	最小二乘
LSF	本地散射函数
LTE	长期演进
LTl	线性时不变
LTV	线性时变
LZF	线性迫零
MA	滑动平均
MAI	多径干扰
MAP	最大后验
MAPSD	最大后验序列检测
MBAE	最小带宽逼近误差
MC	多载波
MC-CDMA	多载波 CDMA

MEP	最小误差概率
MF	匹配滤波器
MIMO	多输入多输出
ML	最大似然
MLSD	最大似然序列检测
MMSE	最小均方误差
MSE	均方误差
NMMSE	归一化最小均方误差
NZP	非零填充
OFDM	正交频分复用
OFDMA	正交频分多址
OOB	带外泄漏
PAM	脉冲振幅调制
PAPR	峰值对平均功率比
PAT	导频辅助传输
P-BEM	多项式 BEM
pdf	概率密度函数
PIC	并行干扰对消
PN	伪噪声
PS	脉冲成形
PSD	功率谱密度
PSK	相移键控
PSP	逐幸存处理
QAM	正交幅度调制
QPSK	正交相移键控
RF	射频
RHS	右侧
RMS	根均方
RPP	规律的周期性置位
SCM	单载波调制
SD	序列检测
SF	扩展函数
SFBC	空频分组编码
SFC	空频编码
SFM	散射函数矩阵
SFN	单频网
SIC	连续干扰对消
SINR	信号与干扰比和噪声比
SIR	信号干扰比

SISO	单输入单输出
SNR	信噪比
SOE	指数函数之和
SOVA	软输出维特比算法
STBC	空时分组编码
STC	空时编码
STFBC	空间—时间—频率块编码
STFC	空间—时间—频率编码
STFT	短时傅里叶变换
SVD	奇异值分解
TDKD	时域克罗内克函数
TDM	时分多路复用
TDMS	时分多路复用交换
TF	时频
TFAR	时间—频率的 AR
TFR	时间—频率表示
TR	传输参考
TV	时变的
US	非相关散射
UWB	超宽带
VSSO	矢量状态标量观测
WCDMA	宽带 CDMA
WH	Weyl-Heisenberg
WLAN	无线局域网
WSS	广义平稳
WSSUS	广义平稳非相关散射
ZF	迫零
ZP	填零
ZP-SCM	填零单载波调制

目 录

第 1 章 时变信道的基本原理

1.1 引言	1
1.2 时变信道的物理性质	2
1.2.1 波形传播	2
1.2.2 多径传播和时间色散	2
1.2.3 多普勒效应和频率色散	3
1.2.4 路径损耗和衰落	5
1.2.5 空间特征	5
1.3 确定性的描述	5
1.3.1 时延—多普勒域—扩展函数	6
1.3.2 延迟尺度域—延迟尺度扩展函数	7
1.3.3 时频域—时变传递函数	8
1.3.4 延时域—时变脉冲响应	9
1.3.5 扩展到多天线系统	10
1.4 随机描述	11
1.4.1 WSSUS 信道	11
1.4.2 扩展到多天线系统	16
1.4.3 非 WSSUS 信道	19
1.5 欠扩展信道	23
1.5.1 色散—欠扩展性质	24
1.5.2 相关—欠扩展性质	25
1.5.3 近似特征值关系	26
1.5.4 时频采样	29
1.5.5 近似 Karhunen-Loève 变换扩展	30
1.6 精简信道模型	33
1.6.1 基扩展模型	33
1.6.2 精简 WSSUS 模型	36
1.6.3 非 WSSUS 简化模型	38
1.7 测量	39
1.7.1 扩频信道探测	39
1.7.2 多载波信道探测	43
1.7.3 扩展到多天线系统	45

1.7.4 二阶统计量测量	45
1.8 结论	49
参考文献	49

第2章 欠扩展 WSSUS 信道的信息理论

2.1 系统模型的作用	54
2.1.1 真实模型	54
2.1.2 文献纵览	55
2.1.3 解决工程问题的容量限	56
2.2 一个离散系统模型	57
2.2.1 信道模型	57
2.2.2 连续时间 I/O 关系的离散化	59
2.3 大带宽体制: 对角化 I/O 关系	68
2.3.1 功率限制	68
2.3.2 非相干容量的定义	69
2.3.3 相干容量上限	69
2.3.4 $C_H(\tau, \nu)$ 中明显上边界容量	70
2.3.5 容量下限	72
2.3.6 数值举例	74
2.3.7 扩展到多天线场景	76
2.3.8 数值举例	78
2.4 大带宽体制下: 有干扰时的 I/O 关系	80
2.4.1 容量下边界	81
2.4.2 数值举例	86
2.5 高 SNR 体制	87
2.5.1 容量下边界	88
2.5.2 数值举例	89
2.6 结论	92
参考文献	93

第3章 快衰落信道下的代数编码

3.1 引言	96
3.1.1 衰落信道模型	96
3.1.2 系统模型	97
3.2 基于乘积距离的编码设计	98
3.2.1 信号空间分集和乘积距离	98
3.2.2 格型星座	100
3.3 格型	100
3.3.1 定义一	100