

天基信息系统丛书

★ ★ ★
★ “十三五” ★
国家重点出版物出版规划项目

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Digital Communication Receivers
Synchronization, Channel Estimation,
and Signal Processing—Basic Material
and Baseband Communications



数字通信接收机同步、
信道估计和信号处理
——基础知识与基带通信

[瑞士]海因里希·梅尔 (Heinrich Meyr)
[比利时]马尔·摩恩克雷 (Marc Moeneclaey) 著
[德国]斯特凡·菲尔特恩 (Stefan A. Fechtel)

武楠 (Wu Nan)
王华 (Wang Hua) 译
匡镜明 (Kuang Jingming)

WILEY

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

天基信息系统丛书

★ ★ ★
★ “十三五” ★

国家重点出版物出版规划项目

北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

Digital Communication Receivers
Synchronization, Channel Estimation,
and Signal Processing—Basic Material
and Baseband Communications

数字通信接收机同步、 信道估计和信号处理 ——基础知识与基带通信

[瑞士]海因里希·梅尔 (Heinrich Meyr)
[比利时]马尔·摩恩克雷 (Marc Moeneclay) 著
[德国]斯特凡·菲尔特恩 (Stefan A. Fechtel)

武楠 (Wu Nan)
王华 (Wang Hua) 译
匡镜明 (Kuang Jingming)

WILEY

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

数字通信接收机同步、信道估计和信号处理. 基础知识与基带通信/ (瑞士) 海因里希·梅尔 (Heinrich Meyr), (比) 马尔·摩恩克雷 (Marc Moeneclae), (德) 斯特凡·菲尔特恩 (Stefan A. Fechtel) 著; 武楠, 王华, 匡镜明译. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.4

书名原文: Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 北京理工大学“985工程”国际交流与合作专项资金资助图书

ISBN 978-7-5682-5499-1

I. ①数… II. ①海… ②马… ③斯… ④武… ⑤王… ⑥匡… III. ①数字通信-通信接收机-同步信号-信道-信号处理 IV. ①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 066986 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2016-4271 号

Copyright ©1988 by John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing, ISBN: 9780471502753, by Heinrich Meyr, Marc Moeneclae, Stefan A. Fechtel, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 220 千字

版 次 / 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 68.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 郭贵娟

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



无线通信系统丛书

2015

ISBN 978-7-302-41000-0

Digital Communication Receivers
Synchronization, Channel Estimation,
and Signal Processing—Basic Material
and Bandwidth Communications

本书的出版得到了北京理工大学“985 工程”
国际交流与合作专项资金的资助和国家外国专家局
“外国文教专家项目”的大力支持，在此表示衷心
的感谢。

WILEY

北京理工大学出版社

译者序

当今社会，“通信”作为最自然而又不可或缺的“元素”，已经完全融入人类社会生产和生活的各个方面。数字通信凭借多方面的突出优势，迅速发展为通信的主流方式。作为数字通信系统中最为关键和复杂的部分，数字通信接收机的设计对整个通信系统的性能具有决定性的影响。因此，数字接收机中的同步、检测以及信道估计等问题一直是学术界和工业界关注的重点，相关的研究工作也产生了大量的文献成果。然而，这些文献往往通过国际学术期刊或者会议发表，缺少从理论和实现两个方面的系统论述，使该领域的研究人员和工程技术人员很难全面、高效地掌握已有的研究方法和成果。

我们翻译的《数字通信接收机——同步、信道估计和信号处理》一书是由 H. Meyr 教授、M. Moeneclaey 教授和 S. A. Fechtel 博士撰写的经典著作。该书不仅对数字通信接收机设计中关键的基础理论进行了深入阐述，而且系统地梳理、总结和比较了大量实用的接收机算法。另外，该书创新性地接收机的实现复杂度作为一个全新的设计维度，把功率效率、频带效率和实现复杂度的折中设计观念贯穿于整个著作，使得读者对不同方法的特点和应用条件有了全方位的认识。该书的三位作者在数字通信接收机理论研究和设计实现方面均具有多年的工作经验，H. Meyr 教授是 IEEE 终身会士，M. Moeneclaey 教授是 IEEE 会士，都是著作等身的权威专家，并且如今仍然在相关领域开展科研工作。该书作为三位作者的代表性著作，已经成为数字接收机设计领域的必读经典，也是相关学术论文广泛引用的权威著作。

该书内容非常丰富，分为五个部分，共 15 章。考虑到读者群可能具有不同的专业背景和实际需求，我们将这本著作的译著分为三册出版。第一册的主



要内容为基础知识和基带通信，包括原著中的概述、第 1 章和第 2 章，由武楠、王华和匡镜明翻译；第二册的主题为时不变信道中的带通通信，包含原著中的第 3 章~第 10 章，由杨德伟、王华、武楠和匡镜明翻译；第三册的主题为衰落信道通信，包含原著中的第 11 章~第 15 章，由邢成文、费泽松、武楠、匡镜明翻译。最后，匡镜明教授对全书进行了审校。

在该书的翻译过程中，得到了北京理工大学通信技术研究所老师与学生的支持和帮助，在此向他们表示衷心的感谢。译著的出版得到了教育部全国优秀博士学位论文作者基金项目（编号：201445）和北京理工大学的资助。借此机会，特别向教育部、北京理工大学给予的支持和帮助表示感谢。

由于全书篇幅极大，翻译整理时间仓促，加之译者水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

2018 年 4 月

献给

Nicole, Claudia, and Tarek

and to Mieke, Sylvia, and Bart

前 言

本书主要介绍数字通信的接收机。“数字”这个词具有双重含义，它不仅意味着信息是以数字形式传输的，还说明了除模拟前端外，接收机完全通过数字信号处理、获取和发送信息的特性。

对通信的移动性和便携性需求的不断增长，要求最佳地使用带宽。这个目标只能通过逼近信息论容量极限的数字通信系统来实现。半导体技术的巨大进步使这种系统的实现成为可能，从而使通信工程师能够经济地实现“硅系统”。该系统实现了：

- (1) 能够大幅简化表示高质量语音或视频信号所需比特率的先进压缩算法；
- (2) 用于功率控制及信道估计、同步、均衡和译码的接收机复杂算法；
- (3) 管理网络流量的复杂协议；
- (4) 用户友好的图形化人机接口。

从另一个角度来看，我们认为当今的通信工程师可以在带宽和功率效率等熟悉的物理层性能与信号处理的复杂度之间进行折中。这使得在设计过程中，结构和算法设计将会紧密地相互影响，而不再像传统方式那样将理论与实现分离开来。

本书在主题的选取和处理方面与通信工程的其他文献有很大不同。本书着眼于信道估计、同步和数字信号处理。在大多数数字通信领域的书籍中，即使提到了同步和信道估计，也只会进行粗浅的描述。这一定会给读者留下这样的印象，即这些处理是微不足道的，且误码性能总会与信道先验已知并理想同步下的极限情况十分接近。但不幸的是，由于以下原因，这个观念并不正确：

- (1) 误码性能：同步和信道估计对误码性能极为关键；



(2) 设计工作量：需要花费大量设计时间来解决这些问题；

(3) 实现：接收机硬件和软件的很大一部分专用于同步和信道估计。

在竭力撰写本书的过程中，我们设定了以下目标：首先，我们努力、系统地组织信息，使其便于通信工程师使用；其次，我们希望读者知道，使用数学的估计理论可以非常简洁地开发信道估计和同步的算法。我们希望本书不仅能向读者提供一系列结果，还能为解决设计问题提供一个简洁的数学工具。

本书可以分为五大部分。在绪论（第一部分）之后，第二部分主要介绍数学背景知识；第三部分考虑基带通信问题；第四部分解决时不变信道上的通带通信问题；第五部分研究了衰落信道上的传输问题。我们根据信道种类的不同对内容进行了组织，这是因为接收机总是为某个给定的信道而设计的。例如，设计用于光纤信道接收机时钟恢复电路的工程师就不需要关注衰落信道的信道估计算法。

1. 基础知识（第二部分）

本书第二部分主要是简单地回顾后续章节中会使用到的随机过程理论、信号分析和估计理论的相关内容。设计该部分的目的不是取代正式的课程，而是补充读者对这部分知识的欠缺。对于精通数学的读者，该部分可以视为对结果的快速总结以及对所用符号的介绍。

2. 基带通信（第三部分）

第三部分有 5 个小节。2.1 节对基带通信进行了简介，重点强调高数据速率的应用。本书讨论了线路编码这个在实际应用中十分重要的问题，它在很多强调通信原理的理论研究书籍中经常被忽略。2.2 节介绍了时钟恢复电路的分类以及影响这些电路性能的干扰因素。接下来的两节（2.3 节和 2.4 节）对两类主要的时钟恢复电路进行了深入分析。本书讨论了误差跟踪同步器（2.3 节）和谱线生成时钟同步器（2.4 节）的差异和共性。本书还研究了中继器链路中抖动积累的影响。在 2.5 节中，本书详细分析了 3 个重要的实际应用的同步器的性能，讨论了自噪声和加性噪声等不同干扰的影响，描述了在时钟恢复电路级联时至关重要的自噪声消除技术。



3. 时不变信道上的带通通信（第四部分）

第四部分第 1 章简要回顾了时不变信道中带通通信的基本原理。在第四部分第 2 章中，本书对最优最大似然接收机进行了严格的推导。与通常的处理方法不同，本书推导出了完整的数字接收机结构，包括数字匹配滤波器、内插器、可变速率抽取器和载波相位旋转器。尽管最佳接收机是不可实现的，但它为实际接收机结构的合理近似奠定了基础，其关键要素即同步检测的原理。在第四部分第 3 章中，本书用估计理论系统地推导了定时和载波相位同步的算法。第四部分第 4 章进行同步器的性能分析。本书推导出同步参数估计方差的下限。这些界限可作为实际同步器的参考。4.3 节分析了载波和符号同步器的跟踪性能。在 4.4 节中讨论了捕获和“滑周”等非线性现象。第四部分第 5 章推导出实际应用中的重要调制格式、误码率性能损失随着载波相位和定时误差的方差变化的函数关系。第四部分第 6 章考虑频率估计数字算法的推导以及这些算法的性能分析。第四部分第 7 章讨论了通过插值和受控抽取进行定时恢复。第四部分第 8 章主要研究工程实现方法。本书讨论了设计方法和 CAD 工具。本书使用最近完成的 DVB（数字视频广播）ASIC 芯片设计作为案例研究，来说明算法与架构设计之间密切的相互作用。

4. 衰落信道上的通信（第五部分）

第五部分第 1 章对衰落信道进行了简介。从时间连续、离散等价平坦和选择性衰落信道模型出发，对衰落信道的统计特性以及离散等价衰落信道的建模和仿真技术进行了研究。第五部分第 2 章关注衰落信道上检测和参数同步的基本原理。基于数学传输模型，本书推导了最优估计-检测接收机的联合检测与同步结构。第五部分第 3 章介绍了用于平坦和选择性衰落信道上同步检测的接收机的可实现结构。第五部分第 3 章综述了内、外接收机的概念，并重点强调了分集的作用。第五部分第 3 章讨论了平坦和选择性衰落信道下内接收器的结构，特别适用于串行或类似 TDMA 的信道接入，详细介绍了判决度量的计算和接收信号的预处理。第五部分第 3 章还简要扩展到了 CDMA 系统。平坦衰落信道的参数同步是第五部分第 4 章的主题，其中详细讨论了非数据辅助（NDA）、判决引导（DD）和数据辅助（DA）平坦衰落信道估计的算法及其性能。第五部分第 5 章介绍了 NDA / DD 选择性衰落信道估计的自适应算法，提出并讨论了 DA 快照捕获和信道插值的方法。作为本书的最后一章，第五部分第 5 章还对非编码传输和编码传输的误码性能，以及 NDA / DD 和 DA 的性能进行了对

比并得出结论。

我们欢迎大家通过以下电子邮件地址向我们发送与本书相关的意见或问题：er@ert.rwth-aachen.de、fechtel@hl.siemens.de、mm@lci.rug.ac.be。

5. 附言

本书原本是作为 Wiley 出版社于 1990 年出版的、由 H. Meyr 和 G. Ascheid 编著的《数字通信中的同步》(Synchronization In Digital Communications) 一书的姐妹篇而撰写的。在编写本书时，我们愈发觉得 1990 年的书名并不能够对书中内容进行充分描述，因此我们改变了本卷的标题。不过，当谈到第 1 卷时，我们仍旧参考 1990 年的出版物。

德国，亚琛

1997 年 8 月

HEINRICH MEYR

MARC MOENECLAËY

STEFAN A. FECHTEL

致 谢

我们想对在本书撰写过程中给予过帮助的所有人表示感谢。我们 (S. Fechtel, H. Meyr) 十分感谢亚琛工业大学 (RWTH) 信号处理集成系统研究所 (ISS) 的前任和现任同事, 他们为我们提供了研究成果, 向我们分享了他们的知识, 审阅了手稿的部分内容, 对文字部分进行了处理, 并就本书主题展开了多次热烈的讨论。我们特别感谢:

(1) 对文字部分的处理。

频率估计的章节是基于 F. Classen 博士的研究进行编写的, 他在第 8 章的撰写和审阅方面做了大量工作。V. Zivojnovic 博士提供了数字插值的结果, 并仔细审阅了第 9 章的内容。ASIC 设计人员的专业知识对第 10 章中的案例研究报告提供了很大的帮助, H. Dawid 博士、O. Joeressen 博士、U. Lambrette 博士和 M. Vaupel 也为本章的编写做出了贡献。S. Bitterlich 在维特比译码器设计方面的专业知识为传统译码器相关文献提供了有益帮助, 他还审阅了手稿的部分内容。

(2) 有价值的讨论和评论。

以下同事花费时间阅读了部分或全部手稿, 包括 H. Dawid 博士、G. Fettweis 博士、O. Joeressen 博士、O. Mauss 博士、F. Mehlman 博士、M. Oerder 博士、M. Pankert 博士、S. Ritz 博士以及 P. Zepter 博士。我们也要感谢研究生 J. Baltersee、G. Fock、T. Grotker、F. Munsche、G. Post、R. Schoenen、C. Schotten、M. Speth 以及 W. Willems, 他们阅读了手稿的部分内容, 并为改进本书提供了有价值的意见。

我们要感谢 Floyd Gardner 博士, 他在本书的撰写过程中提供了许多宝贵

意见。第 10 章案例研究中的芯片是与西门子和 ISS 合作的 DVB 芯片。我们非常感谢支持本项目的管理层成员 R. Schwendta 和 C. von Reventlow 博士的领导,感谢 K. Müller 博士和 F. Frieling 的技术贡献。我们也衷心感谢 Synopsys 公司的同事 M. Antweiler 博士、G. Ascheid 博士、J. Kunkel、J. Stahl 博士以及 R. Subramanian 博士,他们提供了许多建设性意见并进行了深入的讨论。我们还要感谢 DLR(德国宇航中心)的 P. Höher 博士对衰落信道估计部分提供的宝贵意见。

作者之一(M. Moeneclaey)还想对 Katrien Bucket、Geert De Jonghe 以及 Mark Van Bladel 表示感谢,他们在手稿某些部分的准备过程中提供了帮助。

(3) 手稿的准备。

如果没有 Birgit Merx 和 Gustl Stüsser 的努力,这本书将永远无法完成。Gustl Stüsser 出色地绘制了几乎所有的插图。Birgit Merx 创建并编辑了全部的最终版手稿。除了许多其他职责之外,她还非常善于处理和平衡三位作者、纽约的出版商以及快要到达极限的软件包之间的关系。

H. M.

M. M.

S. A. F.

关于作者

Heinrich Meyr 在过去的 30 年中一直在通信理论、同步和数字信号处理领域广泛地开展工作。他的研究已被应用于许多工业产品的设计。他在瑞士的苏黎世联邦理工学院 (ETH Zürich) 获得了理学硕士和博士学位。自 1977 年以来,他一直在亚琛工业大学 (RWTH Aachen) 担任电气工程教授,并领导信号处理集成系统研究所,负责分析和设计用于通信应用的复杂信号处理系统。Meyr 博士与他人合作创办了 CADIS GmbH 公司,并于 1993 年被加利福尼亚州山景城的新思科技 (SYNOPTIS) 收购。CADIS 将工具套件 COSSAP 商业化,现在已被全球工业界广泛使用。Meyr 博士是两家通信公司的董事会成员。他发表了许多 IEEE 论文,并于 1990 年与 Gerd Ascheid 博士共同编写了由 Wiley 出版社出版的《数字通信中的同步》第一卷 (Synchronization in Digital Communications, Volume I)。他是 IEEE 会士。

Marc Moeneclaey 是 Flemish 科学研究基金的研究主任,也是比利时根特大学通信工程实验室的兼职教授。他的主要研究课题是统计通信理论、载波和符号同步、带宽有效的调制和编码、扩频以及卫星和移动通信。Moeneclaey 博士在根特大学的电气工程专业获得了文凭和博士学位,并在国际期刊和会议发表了 150 多篇科技论文。从 1992 年到 1994 年,他在 IEEE 通信汇刊担任同步技术领域的编辑。

Stefan A. Fechtel 自 1993 年以来一直在亚琛工业大学信号处理集成系统研究所担任项目经理和高级研究工程师,他的主要研究领域是通信和估计理论、

信道衰落、单载波和多载波调制的同步以及信道编码。Fechtel 博士在德国亚琛获得亚琛工业大学文凭，于 1987 年在劳伦斯的堪萨斯大学获得硕士学位，于 1993 年在亚琛工业大学获得博士学位。他在国际期刊和会议发表了 20 篇科技论文。自 1992 年以来，他一直担任多个期刊的共同编辑和审稿人，其中包括 IEEE 通信汇刊。

目 录

第一部分 绪 论	
绪论	003
第二部分 基础知识	
第 1 章 基础知识	011
1.1 平稳与循环平稳随机过程	012
1.1.1 连续时间平稳随机过程	013
1.1.2 连续时间循环平稳随机过程	014
1.1.3 离散时间平稳随机过程	018
1.1.4 实例	020
1.1.5 要点	024
参考文献	025
1.2 复包络表示	025
1.2.1 确知信号的复包络	026
1.2.2 随机过程的复包络	034
1.2.3 实例	041
1.2.4 要点	043
参考文献	043
1.3 带限信号	044
1.3.1 相关函数与功率谱	044

1.3.2	采样定理	045
1.3.3	带通信号采样	046
1.3.4	要点	050
	参考文献	051
1.4	估计理论基础	052
1.4.1	估计误差的界	052
	参考文献	055

第三部分 基带通信

第 2 章	基带通信	059
2.1	数字基带通信简介	060
2.1.1	基带 PAM 通信系统	060
2.1.2	消除码间串扰的奈奎斯特准则	064
2.1.3	线路编码	068
2.1.4	要点	070
2.1.5	参考文献介绍	071
	参考文献	075
2.2	时钟同步	077
2.2.1	引言	077
2.2.2	时钟同步器的分类	078
2.2.3	实例	079
2.2.4	时钟同步器的干扰	084
2.3	误差跟踪同步器	085
2.3.1	误差跟踪同步器的一般结构	085
2.3.2	定时误差检测器输出信号在开环状态下的统计特性	088
2.3.3	等效模型及其含义	089
2.3.4	线性化等效模型	092
2.3.5	线性化的定时误差的方差	094
2.3.6	离散时间混合式同步器	099
2.3.7	误差跟踪同步器的仿真	102
2.3.8	要点	104
2.3.9	参考文献介绍	105
2.3.10	附录	106