

WILEY

电力线通信

——电力线窄带和宽带通信的理论与应用

[南非]亨德里克·C.费雷拉 [加]卢茨·兰普

[英]约翰·纽伯里 [南非]西奥·G.斯瓦特 著 肖勇 钟清 党三磊 译

Power Line Communications

Theory and Applications for Narrowband and
Broadband Communications over Power Lines

Editors

Hendrik C. **Ferreira**

Lutz **Lampe**

John **Newbury**

Theo G. **Swart**



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

WILEY

电力线通信

——电力线窄带和宽带通信的理论与应用

[南非]亨德里克·C.费雷拉 [加]卢茨·兰普

[英]约翰·纽伯里 [南非]西奥·G.斯瓦特 著 肖勇 钟清 党三磊 译

Power Line Communications

Theory and Applications for Narrowband and
Broadband Communications over Power Lines

Editors

Hendrik C. **Ferreira**

Lutz **Lampe**

John **Newbury**

Theo G. **Swart**



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对电力线通信 (PLC) 相关技术做了深入的研究和介绍, 全书共分为 9 章, 分别从信道特性、电磁兼容、耦合、数字传输技术、PLC 系统协议、基于网络技术的 PLC 工业标准和国际标准、系统和实施 7 个方面做了详细的分析和讲解。

本书适用于接触 PLC 的初学者及与电力线通信相关的人员。

Title: Power Line Communications Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines by Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury, Theo G. Swart.

ISBN: 978-0-470-74030-9

Copyright © 2010 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Electric Power Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited. 所有版权保留。本翻译书由英文版的出版方约翰威立有限公司授权翻译, 对于翻译的准确性由中国电力出版社负责, 在未经版权持有者约翰威立有限公司书面许可的情况下, 本书的任何部分不得以任何形式进行复制和再版。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力线通信: 电力线窄带和宽带通信的理论与应用/(南非) 费雷拉 (Ferreira, H. C.) 等著 肖勇 钟清, 党三磊译. —北京: 中国电力出版社, 2014. 9

书名原文: Power line communications: theons theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines

ISBN 978-7-5123-5419-7

I. ①电… II. ①费…②肖…③钟…④党… III. ①电力线载波通信-研究 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 130216 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 529 千字

印数 0001—1000 册 定价 105.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编写人员名单

Pouyan Amirshahi

Shared Spectrum

Section 2. 4

Masoud Ardakani

University of Alberta

Section 5. 3. 4

Inigo Berganza Valmala

Iberdrola

Sections 8. 2 and 8. 3

Gerd Bumiller

iAd GmbH

Sections 6. 3 and 8. 2

Francisco J. Cañete

Universidad de Málaga

Section 2. 5

Giulio Colavolpe

University of Parma

Section 5. 3. 3

Klaus Dostert

University of Karlsruhe

Sections 2. 2. 5, 2. 3, 2. 7,
2. 8, 2. 9 and 5. 3. 1

Hendrik C. Ferreira

University of Johannesburg

Editor, Section 5. 2. 5

Dario Fertonani

Scuola Superiore Sant' Anna

Section 5. 3. 3

Stefano Galli

Panasonic

Section 2. 2 (except 2. 2. 5),

Section 7. 3

Holger Hirsch

University of Duisburg-Essen

Chapter 3

Halid Hrasnica

Eurescom GmbH

Sections 6. 2 and 6. 3

Piet A. Janse van Rensburg

Walter Sisulu University

Chapter 4

Masaaki Katayama

Nagoya University

Section 2. 6

Mohsen Kavehrad

The Pennsylvania State

University

Section 2. 4

Michael Koch

Devolto AG

Chapter 3, Sections 7. 4 and 7. 5

Lutz Lampe

University of British Columbia

Editor, Section 6. 3

Haniph A. Latchman

University of Florida

Sections 7. 2 and 8. 4

Sunguk Lee

University of Florida

Section 7. 2

Maxim Lobashov

Vienna University of

Technology

Section 6. 3

John Newbury

The Open University

Editor

Vladimir Oksman

Infineon Technologies

Section 7. 3

Moisés V. Ribeiro

Federal University of Juiz de

Fora

Section 8. 6

Alberto Sendin Escalona

Iberdrola

Sections 8. 2 and 8. 3

Thomas Stockhammer

Nomor Research GmbH

Section 6. 4

Theo G. Swart

University of Johannesburg

Editor, Section 5. 2. 5

Andrea M. Tonello

University of Udine

Section 5. 3. 2

Daisuke Umehara

Kyoto University

Section 5. 3. 3

A. J. Han Vinck

University of Duisberg-Essen

Section 5. 2 (except 5. 2. 5)

Eric R. Wade

University of Southern

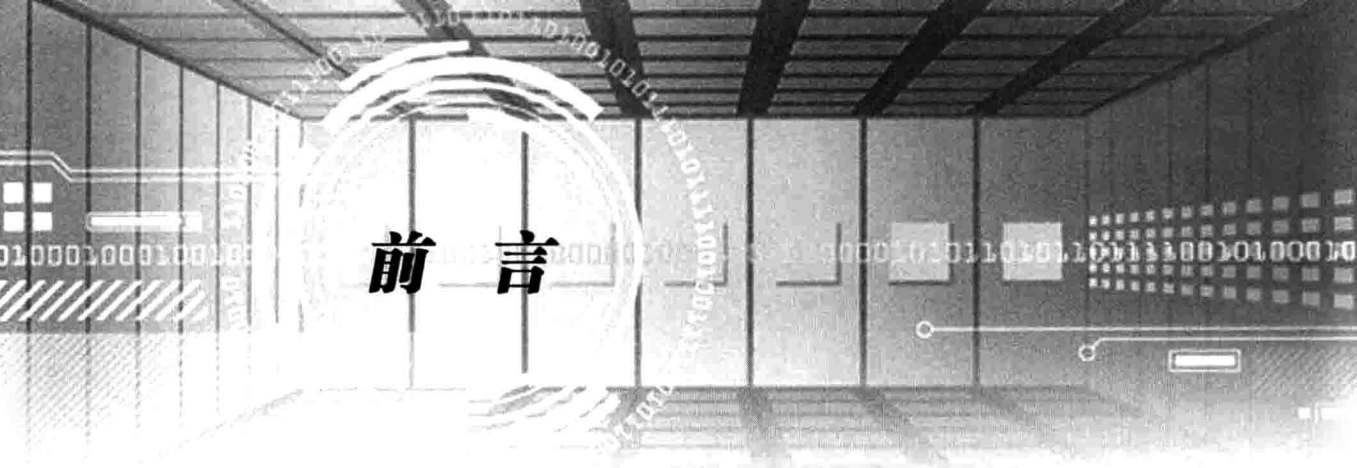
California

Section 8. 5

Lawrence W. Yonge III

Intellon Corporation

Section 8. 4



前言

本书涵盖了电力线通信 (PLC) 中具有广泛研究意义的大部分内容, 因此不仅是一本关于 PLC 的书, 也是介绍电信领域基础知识的书。本书的编写灵感来源于 1997 年由多家杂志社参与的电力线通信国际研讨会, 与会人员发现研究出版、标准文档、贸易文献中的信息大量遗失。因此, 在本书编写过程中, 编者力图涵盖现已规范一致的技术和信息以及一些极具潜力但正在研究的领域。

本书的编写目的在于带领初学者进入 PLC 这一让人兴奋的领域, 激励他们更深层次地研究, 这或许就能促成未来的共识。或许这本书还能为今后对本书中所涉及的某一个单独的子领域的研究铺平道路。

在本书的编写过程中, 有来自 11 个不同国家的 27 个研究所的 31 位科技人员参与。

如前所述, 这本书的灵感源自电力线通信国际研讨会议, 这是一个自 2006 年以来一直由 IEEE 协会主办的 IEEE 会议。本书中所包括的很多内容也是由这会议的议事演变而来 (参考 <http://www.isplc.org/docsearch>)。

编者想将此书献给来自德国杜伊斯堡—埃森大学的 A.J. Han Vinck 教授, 感谢他为 PLC 研究做出的贡献。1997 年在埃森大学, 他组织了关于电力线通信的第一个国际研讨会, 这是他研究生涯中的许多领导举措之一。

缩 略 语

1D	一维
2D	二维
3D	三维
AC	交流电
ACF	交变电流
ADSL	非对称数字用户线
ADTDM	先进的动态时分复用
AES	先进的加密方案
AFE	模拟前端
AGC	自动增益控制
AL-FEC	应用层的前向纠错
AM	调幅
AMM	自动抄表管理
AMN	人工电源网络
AP	接入点
ARQ	自动重复请求
AVLN	AV 逻辑网络
AWGN	加性高斯白噪声
BBC	宽带不好的情况下
BER	误码率
BGC	宽带良好的情况下
BH	突发头
BICM	比特交织编码调制
BPC	每载波的比特数
BPL	电力线宽带
BPRS	二进制伪随机序列
BPSK	二进制相移键控
BSS	基本服务集
C-CDF	互补累积分布函数
CCF	互相关函数
CCL	常见的汇聚层

CCo	中央协调
CDF	累积分布函数
CDMA	码分多址
CENELEC	欧洲电工标准化委员会
CEPCA	消费电子电力线通信联盟
CEPT	邮政和电信管理的欧洲会议
CF	导电布
CFP	无竞争周期
CISPR	国际无线电干扰委员会
CL	汇聚层/兼容级别
CM	连接管理器
CP	循环前缀
CPCS	通用部分汇聚子层
CPE	用户端设备
CPS	综合功率信号
CRC	循环冗余码
CRP	冲突解决方案
CS	临界采样
CSI	信道状态信息
CSMA	载波侦听多路访问
CSMA/CA	载波监听多路访问/冲突避免
CTS	清除发送
C/DWDM	粗/密集波分复用
DC	直流
DCM	距离节约型映射
DCT	离散余弦变换
DCT-OFDM	离散余弦变换的正交频分复用
DDS	直接数字频率合成器
DFT	离散傅里叶变换
DIM	距离增加的映射
DLMS/COSEM	设备语言规范/能源计量配套规范
DMT	离散多音
DPM	距离保护映射
DRM	距离还原映射
DSSS	直接序列扩频

DUT	被测设备
DWMT	离散小波多音
EMC	电磁兼容性
EMI	电磁干扰
EN	欧洲标准
ERC SE	欧洲无线电通信委员会的频谱工程
ES	ETSI 规范
ESI	编码符号标识
ETSI	欧洲电信标准协会
EUT	被测设备
EXIT	外信息转移
FB	滤波器组
FBA	前向后向算法
FC	帧控制
FDMA	频分多址
FEC	前向纠错
FFT	快速傅里叶变换
FH	跳频
FH-CDMA	跳频码分多址
FIR	有限脉冲响应
FMT	滤波多音
FPGA	现场可编程门阵列
FSK	频移键控
FTTx	到 x 的光纤
GI	保护间隔
GPRS	通用分组无线业务
GPS	全球定位系统
HD-PLC	高清电力线通信
HDTV	高清晰度电视
HE	头端
HF	高频
HPPA	HomePlug 电力线联盟
HV	高压
ICI	载波间干扰
IDFT	离散傅里叶逆变换

IFFT	快速傅里叶逆变换
IFT	傅里叶逆变换
IH	在家庭
INL	干扰网络列表
IP	互联网协议
IPTV	互联网协议电视
ISDN	综合业务数字网
ISN	阻抗稳定网络
ISO/OSI	国际标准化组织/开放系统互连
ISP	系统间协议
ISI	符号间干扰
JWG	联合工作组
LA	拉美
LAN	局域网
LCL	纵向转换损耗
LDPC	低密度奇偶校验
LF	低频
LID	链路标识符
LLC	逻辑链路控制
LLR	对数似然比
LPTV	线性周期时变
LT	Luby 变换
LTI	线性时不变
LTV	线性时变
LV	低电压
LVDN	低压配电网
LVDS	低电压差分信号
MAC	媒体访问控制
MAP	最大后验概率
MC	多载波
MCSS	多载波扩频
MFBO	MAC 帧边界偏移
MMSE	最小均方误差
MoCA	同轴电缆多媒体联盟
MPDU	MAC 协议数据单元

MSDU	MAC 服务数据单元
MTBA	工件的平均时间
MTL	多导体传输线
MV	中压
NCo	邻近中央协调
NCS	非临界采样
NEK	网络加密密钥
NL	网络层
NLS	非线性系统
NORM	以 NACK 为导向的可靠多传播性
NTU	网络终端单元
OFDM	正交频分复用
OOK	通断键控
OPERA	开放的 PLC 欧洲研究联盟
O-QAM-OFDM	偏移正交幅度调制的正交频分复用
PAM	脉冲振幅调制
PB	PHY 块
PBB	PHY 块体
PBH	PHY 块头
PBCS	PHY 块校验序列
PBER	PHY 块错误率
PC	个人电脑
PCB	印刷电路板
PCS	物理载波侦听
PCo	代理协调员
PCO	只有预先代码
PDF	概率密度函数
PDH	准同步数字体系
PDU	协议数据单元
PER	误包率
PGA	可编程增益放大器
PHY	物理或物理层
PLC	电力线通信
PPDU	物理层协议数据单元
PR	完全重构

PSD	功率谱密度
PSK	相移键控
PVC	聚氯乙烯
QAM	正交幅度调制
QoS	服务质量
QPSK	四相相移键控
R&TTE	无线电和电信终端设备
RADAR	飞机无线电探测和测距
RAM	随机存取存储器
REMP LI	通过电力线和互联网实时能源管理
RF	无线电频率
RMS-DS	均方根时延扩展
ROBO	稳健的调制
RRC	根升余弦
RS	里德—索罗门
RTP	实时传输协议
RTS	请求发送
RUN-M	renesas 公司和 ubiquitous 公司联合开发的 通信协议网络层
SACK	选择性确认
SALA	时隙 ALOHA 与本地确认
SAP	服务访问点
SAR	分段和重组
SCADA	监督控制和数据采集
SCP	共享时期
SD	标准定义
SDH	同步数位阶层
SDU	服务数据单元
SFN	单频网
S-FSK	扩频频移键控
SISO	软输入软输出
SNR	信噪比
SOF	帧起始

SOT	开始传输
S/P	串行到并行
SP	服务提供者
SPA	和积算法
SSCL	特定服务汇聚层
SSCS	服务特定会聚子层
SST	扩频技术
STF	专案组
TA	令牌公布
TC	技术委员会
TCC	涡轮卷积编码
TCL	横向转换损耗
TCP	传输控制协定
TCTL	横向转换传输损耗
TDM	分时多工
TDMA	时分多址
TEM	横向电磁
T-ISN	T形阻抗稳定网络
TH-CDMA	跳时码分多址
TL	传输线/传输层
TLT	传输线变压器
TMI	映射标识符
TS	技术规格
TXOP	传输机会
UDP	用户数据报协议
UPA	通用电力线协会
UWB	超宽带
VCS	虚拟载波侦听
VDSL	超高速数字用户线
VHF	超高频
VOLP	互联网语音协议
WNG	白噪声发生器

目 录

编写人员名单
前言
缩略语

第 1 章 概论

The Editors

参考文献 4

第 2 章 信道特性

P. Amirshahi, F. Canete, K. Dostert, S. Galli, M. Katayama and M. Kavehrad

2.1 概述.....	5
2.2 信道模型基础.....	5
2.2.1 室内/室外型拓扑结构的简要回顾	7
2.2.2 带宽受限信道基本定义和特性.....	9
2.2.3 在 HF 和 VHF 频段的室内通道的特性	10
2.2.4 室外通道的特性 (LV 和 MV)	12
2.2.5 低频通道的特性	13
2.2.6 基本方法: 确定性和经验模型	15
2.2.7 建模方法的优点和缺点	18
2.2.8 综合确定性方法和统计方法: 形成一种复合模型	19
2.3 室外通道型号: LV 案例	20
2.3.1 在欧洲、亚洲和美国接入网络的拓扑结构	20
2.3.2 传输线理论的一些基础知识	22
2.3.3 电力线信道模型	25
2.4 室外信道模型: 中压	31
2.4.1 架空中压传输线传播	31
2.4.2 信道传递函数	39
2.4.3 中压电力线背景噪声	40
2.5 室内信道模型	41
2.5.1 模型原理	41
2.5.2 LTI 信道模型	43
2.5.3 LPTV 信道模型	46

2.5.4	参考信道模型	52
2.5.5	讨论	54
2.6	噪声和扰动	55
2.6.1	时域中的 PLC 噪声	55
2.6.2	频域的 PLC 噪声	56
2.6.3	数学表示	57
2.6.4	PLC 噪声特性自适应编码、调制、解调	60
2.7	测量技术	61
2.7.1	引言	61
2.7.2	散射矩阵	62
2.7.3	传递函数	63
2.7.4	测量设置	63
2.8	PLC 通道模拟工具	65
2.8.1	高频范围的电力线通道模拟	65
2.8.2	低频范围的电力线通道仿真	67
2.9	接入域的参考通道	69
2.9.1	参考通道的简要描述	70
2.9.2	参考通道的参数	71
	参考文献	74

第3章 电磁兼容 80

H. Hirsch and M. Koch

3.1	简介	80
3.2	电磁兼容性考虑参数	81
3.2.1	传输线上的电磁兼容相关参数	81
3.2.2	耦合度	82
3.2.3	电磁场	83
3.3	电磁辐射	84
3.3.1	辐射排放	84
3.3.2	传导辐射	85
3.4	电磁敏感度	87
3.5	EMC 协调	87
3.5.1	兼容性级别	88
3.5.2	极限的定义	88
3.6	欧洲 EMC 规则	89
3.6.1	PLC 规则	89
3.6.2	市场准入	89
3.6.3	干扰投诉事件中的规则	90
3.7	结论	91

参考文献.....	91
-----------	----

第4章 耦合

93

P. A. Janse van Rensburg

4.1 简介	93
4.2 滤波的基础知识	96
4.3 变压器的电容耦合器设计	98
4.3.1 频率的规范	99
4.3.2 阻抗值/匝数比.....	99
4.3.3 最高电压值.....	100
4.3.4 最大电流值.....	100
4.3.5 磁芯.....	100
4.3.6 电流密度.....	100
4.3.7 集肤效应.....	100
4.3.8 股数.....	101
4.3.9 匝数.....	101
4.3.10 磁通密度	101
4.3.11 漏电感	101
4.3.12 扩大漏感	101
4.3.13 串联电感	101
4.3.14 磁化电感	102
4.3.15 检查联合磁通密度值	102
4.3.16 减少磁化电感	102
4.3.17 评价和讨论	102
4.4 阻抗匹配.....	104
4.4.1 试图阻抗匹配值得吗?	106
4.4.2 实际绕组比应该是什么?	106
4.4.3 是否有一个完美的接收器匝数比?	107
4.4.4 是否有一个完美的发射器匝数比?	108
4.4.5 $a_{TX}=a_{RX}$ 能使功率传递最优化吗?	109
4.4.6 a_{TX} 和 a_{RX} 能独立优化吗?	109
4.4.7 应该如何理解和完成这些研究结果?	110
4.5 实验验证.....	111
4.5.1 简介.....	111
4.5.2 实验装置.....	112
4.5.3 模拟发射器和接收器.....	115
4.5.4 仿真结果的实验验证.....	115
4.5.5 为阻抗适应的电力出口分类.....	117
4.5.6 双阻抗适应耦合器.....	119

4.6 进一步的可能性..... 122
参考文献 123

第5章 数字传输技术 125

M. Ardakani, G. Colavolpe, K. Dostert, H. C. Ferreira, D. Ferttonani, T. G. Swart, A. M. Tonello, D. Umethara and A. J. H. Vinck

5.1 概述..... 125
5.2 窄带 PLC 系统的调制和编码 125
5.2.1 信号干扰..... 126
5.2.2 容量和中继器的结构..... 132
5.2.3 编码..... 134
5.2.4 频移键控..... 138
5.2.5 编码和调制结合..... 143
5.2.6 结论..... 153
5.3 宽带 PLC 系统的调制和编码 153
5.3.1 扩频调制..... 153
5.3.2 多载波系统..... 165
5.3.3 脉冲噪声抑制..... 179
5.3.4 LDPC 码 189
5.4 结论..... 195
参考文献 195

第6章 PLC 系统协议 202

G. Bumiller, H. Hrasnica, L. Lampe, M. Lobashov and T. Stockhammer

6.1 简介..... 202
6.2 宽带 PLC 媒体访问控制 (MAC) 层 202
6.2.1 MAC 层的组成 203
6.2.2 多路访问方案..... 203
6.2.3 媒体访问控制层协议..... 205
6.2.4 MAC 协议在宽带 PLC 的实现..... 208
6.2.5 总结..... 208
6.3 PLC 协议支持的能源管理系统 209
6.3.1 如何建立 PLC 网络 209
6.3.2 系统架构..... 210
6.3.3 媒体访问控制层..... 212
6.3.4 网络层..... 219
6.3.5 传输层..... 220
6.3.6 通用会聚层..... 223