

面向AMI的电力线通信 理论和应用

谷志茹 黄晓峰 王 奇 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



面向 AMI 的电力线通信 理论和应用

谷志茹 黄晓峰 王 奇 贺正芸
易吉良 陈顺科 龙永红 著

机械工业出版社

利用现有的电网资源,建立高速、双向和实时的通信系统,是实现智能电网(Smart Grid, SG)的基础。在生态环保的前提下,节约了宝贵资源。现阶段基于电力线的通信技术,在满足传输速率或误比特率的基础上选择基带映射模式,同一时刻每个子信道上采用相同的映射方式和发送功率,设计映射和编码等参数均以最差时的信道状况为依据,为了抗干扰,屏蔽某些干扰严重的子载波,所以数据帧冗余,频谱利用率降低,当信道具有较大干扰时,其通信速度陡降。本书在研究窄带(9~95 kHz)电力信道和噪声模型的基础上,从两个方面提高和稳定数据的传输率:一方面在物理层通过主元分析的方法改进符号同步检测性能并抑制电力噪声,并采用适于软判决解映射和解码的自适应子载波比特映射方式;另一方面在网络层采用自顶向下,双层鉴权的入网方法和实时在线质量监测策略。最后将所研究低压窄带电力载波通信技术应用用于AMI(Advanced Metering Infrastructure, 先进计量基础架构)系统,设计实现网络层入网方法,并完成系统组网测试。本书对相关科研人员和高等院校研究生、博士生具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

面向AMI的电力线通信理论和应用 / 谷志茹等著.

—北京:机械工业出版社,2017.10

ISBN 978-7-111-58126-0

I. ①面… II. ①谷… 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(2017)第245501号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码 100037)

策划编辑:朱 历 责任编辑:陈大立

责任校对:张万英 封面设计:付海明

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017年11月第1版第1次印刷

169mm×239mm·9.5印张·200千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58126-0

定价:40.00元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

利用现有的电网资源,建立高速、双向和实时的通信系统,是实现智能电网(Smart Grid, SG)的基础,在生态环保的前提下,节约了宝贵资源。基于计量和 Home LAN 应用的电网用户,主要集中于低压段的进户线路和户内线路,如何使高速通信技术适应于低压电网,是研究电力线通信(Power Line Communication, PLC)的重点。低压电力信道具有大的信号衰减、时变特性和强噪声干扰,一定程度上限制了高速的数据通信,而通过正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)调制技术,将高速串行数据流分割为低速并行数据流,并调制在相互正交的子载波上实现并行传输,能够有效对抗信道多径引起的码间串扰和衰落引起的误码率,提高抗噪声干扰的能力,在电力通信中得到迅速发展。

现阶段基于电力线的通信技术,在满足传输速率或误比特率的基础上选择基带映射模式,同一时刻每个子信道上采用相同的映射方式和发送功率,设计映射和编码等参数均以最差时的信道状况为依据,屏蔽某些干扰严重的子载波,缺点是数据帧冗余,频谱利用率降低,当信道具有较大干扰时,其通信速度陡降。因此,本书在研究窄带(9~95 kHz)电力信道和噪声模型的基础上,从两个方面提高和稳定数据的传输率:一是在物理层通过主元分析的方法改进符号同步检测性能并抑制电力噪声,并采用适于软判决解映射和解码的自适应子载波比特映射方式;二是在网络层采用自顶向下,双层鉴权的入网方法和实时在线质量监测策略,并将所研究的低压窄带电力载波通信技术应用先进计量基础架构(Advanced Metering Infrastructure, AMI)系统,设计实现网络层入网方法并完成系统组网测试。具体内容如下:

(1) 通过对窄带(9~95 kHz)电力信道平稳和非平稳分布的噪声进行实际环境的测量,构建特性参数所描述的随机模型,模拟真实的电力环境,设计和评测最优信道容量方法。

(2) 选择 G3-PLC 协议的物理层,建立 OFDM 上下行通信链路,作为本书的系统模型,并提出传输性能优化的 OFDM 系统,消除了电力噪声干扰。

(3) 在信道模型已知的前提下,确定子载波误码率(BER)与信道传输率的数学关系和公平性能约束关系。在公平约束性能的条件下,通过简单非迭代离散方法动态分配比特。在总体 BER 和均匀功率分配的限制下,解决最优容量问题,即最大化传输速率。基于所研究物理层技术和已有 MAC 层和路由层协议,构建

基于 OFDM 电力载波通信的 AMI 系统,设计适配于 G3 模块和智能终端的网络层,提出自动抄表系统入网方法和在线质量监测策略,完成入网测试、通信网络质量测试、可靠性和稳定性测试。

作者

2017 年 8 月 18 日

目 录

前言	
第 1 章 概述	1
1.1 AMI 系统概述	1
1.2 PLC 技术概述	2
1.3 AMI 系统研究现状与发展趋势	3
1.4 PLC 技术研究现状与发展趋势	4
1.4.1 PLC 技术的研究动态	4
1.4.2 电力信道的研究动态	5
1.4.3 电力噪声抑制方法的研究动态	6
1.4.4 自适应基带映射方法的研究动态	7
1.5 本书的主要内容安排	9
第 2 章 低压电力线信道特性与建模研究	11
2.1 引言	11
2.2 低压电力信道的测量与分析	11
2.2.1 测试环境	11
2.2.2 信道的输入阻抗测量	12
2.2.3 信道的衰减特性测量	15
2.2.4 信道的噪声特性测量	19
2.3 低压电力传输信道建模	26
2.4 低压电力线噪声建模	28
2.4.1 电力线噪声建模	29
2.4.2 电力线噪声模型评价	33
2.5 本章小结	36
第 3 章 低压电力线通信技术标准与选择研究	37
3.1 引言	37
3.2 PLC 调制方式	37
3.2.1 单载波调制方式	38
3.2.2 扩频调制方式	38
3.2.3 OFDM 调制方式	39
3.3 PLC 技术标准	41

3.3.1 IEC 61334 标准	41
3.3.2 PRIME 标准	41
3.3.3 G3-PLC 标准	41
3.3.4 IEEE 1901.2 标准	42
3.3.5 ITU-T G.hnem 标准	42
3.4 PLC 技术选择	42
3.4.1 S-FSK 和 OFDM 性能比较	43
3.4.2 G3 和 PRIME 性能比较	44
3.5 G3-PLC 物理层信号处理流程及性能分析	48
3.5.1 G3-PLC 系统结构	48
3.5.2 G3-PLC 物理层信号	49
3.5.3 性能分析	50
3.6 基于 G3-PLC 的传输性能优化系统	52
3.6.1 电力信道传输容量分析	53
3.6.2 基于 G3-PLC 的传输性能优化系统	54
3.7 本章小结	55
第 4 章 低压电力线通信噪声抑制方法研究	56
4.1 引言	56
4.2 系统模型及参数	57
4.2.1 电力噪声抑制系统	57
4.2.2 噪声模型和参数	57
4.2.3 OFDM 信号和参数	63
4.3 脉冲噪声抑制方法	64
4.3.1 时域非线性抑制方法	64
4.3.2 组合非线性噪声抑制	66
4.4 背景噪声抑制方法	67
4.4.1 主元分析	67
4.4.2 符号检测	69
4.4.3 信号秩判定	70
4.4.4 信号重构	71
4.4.5 性能比较	72
4.5 本章小结	78
第 5 章 低压电力线通信自适应基带映射方法研究	79
5.1 引言	79
5.2 系统模型及参数	80

5.2.1 基于 G3 的自适应 OFDM 系统	80
5.2.2 信道和噪声模型	82
5.3 适于软判决的基带映射及解映射方法	83
5.3.1 基于 G3 的基带映射	83
5.3.2 适于软判决的基带映射改进	84
5.3.3 软判决解映射方法	85
5.3.4 性能比较	86
5.4 最优传输率比特分配	88
5.4.1 映射模式阈值确定	88
5.4.2 比特分配算法	90
5.4.3 性能分析	91
5.5 本章小结	93
第 6 章 面向 AMI 的 OFDM 通信系统及应用研究	94
6.1 引言	94
6.2 通信架构	95
6.3 基于 G3 的电力线载波模块硬件设计	96
6.3.1 硬件结构	96
6.3.2 硬件接口	97
6.4 基于 G3 的电力线载波模块软件设计	99
6.4.1 物理层设计	99
6.4.2 网络层入网方法	102
6.4.3 通信链路在线质量监测策略	107
6.4.4 软件接口	114
6.5 AMI 系统测试	115
6.5.1 测试配置	115
6.5.2 入网测试	117
6.5.3 通信网络质量测试	118
6.5.4 组网通信能力测试	121
6.6 本章小结	122
附录 G3 物理层仿真程序	123
参考文献	142

第1章 概述

电网是国民经济的命脉，是我国社会和经济发展的强有力保障，但随着全球经济的快速发展和各国不断扩大的电网规模，凸显两个重要的问题——环境保护和节能减排。随着通信技术的日新月异，用户对用电安全、电能质量和用电智能也提出了更高的要求。传统的电力网络面临空前的环境和资源压力，而迫于市场竞争，电力系统将进行全球范围内的调整和变革。许多国家相继提出了“智能电网”概念，确定了将智能电网作为未来发展的方向。

1.1 AMI 系统概述

先进计量基础架构（Advanced Metering Infrastructure, AMI）是智能电网最核心和最基础的部分，其在体系结构上与传统的自动抄表（Automatic Meter Recording, AMR）系统相同，但建设的目标、要求以及实现方法等与传统 AMR 系统都不相同，其中最大的区别在于用户和电力公司的双向互动。因此，先进通信技术是 AMI 高速、可靠和实时数据传输的保障，是其重要支撑子系统。

如图 1-1 所示，安装在用户端的智能电能表、位于电力公司内的量测数据管理系统（MDMS）和连接它们的通信系统组成了先进计量基础架构。其通信系统包括前置机、智能终端、智能电能表和户内终端系统。户内终端和电力公司控制

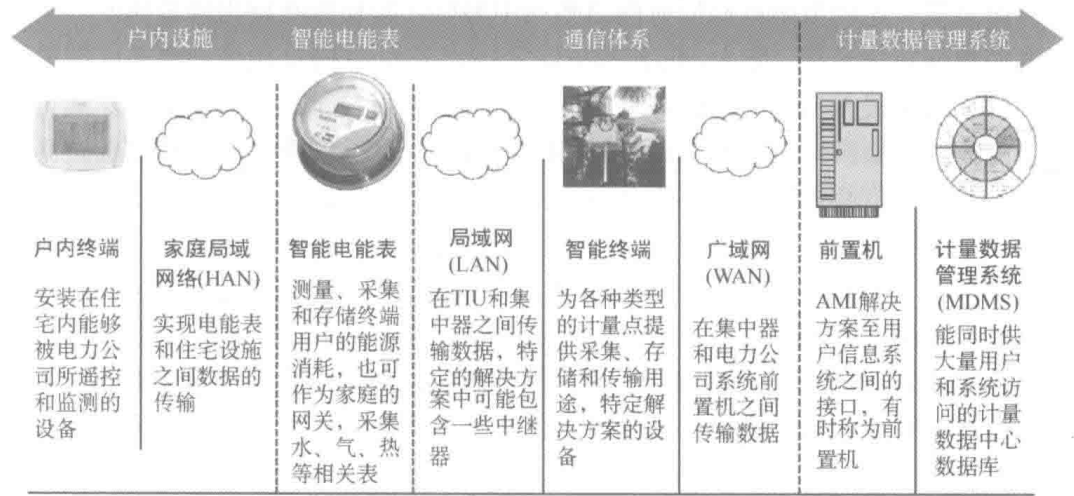


图 1-1 AMI 的组成示意图

中心的前置机通过家庭局域网络（HAN）、局域网络（LAN）和广域网络（WAN）实现需求侧管理和双向通信。智能终端下辖多台智能电能表，这些智能电能表根据需要，实现多种计量，设定计量间隔，并具有双向通信功能。同时支持远程设置、定时或随机计量读取、接通或断离和双向计量等功能。有的也可以作为网关，通向用户室内网络，起到用户端口的作用。为达到需求侧管理的目的，提供给用户实时用电信息和电价，并对用户室内用电装置实现负荷控制。

AMI 最关键点是智能电能表。智能电能表 and 传统电能表的最大区别在于它是电力公司和用户双向互动的桥梁，它不仅显示出用电的细节，实时采集传输数据，同时也可以接受电力公司对它进行远程控制和配置，比如电价的更新，建立连接或者断开连接。智能电能表用户，主要集中于低压段的进户线路和户内线路，如何使高速通信技术适应于低压电网，是研究电力线通信的重点。低压电力信道具有大的信号衰减、时变特性以及强的噪声干扰，一定程度上限制了高速的数据通信，应用于智能电能表的电力线通信（Power Line Communication, PLC）技术，在最大限度提高传输速率的前提下，必须解决信道多径引起的码间串扰和衰落引起的误码率，提高抗噪声干扰的能力^[1]。

1.2 PLC 技术概述

充分利用现有的电力网络资源的 PLC 技术，在传输电能的同时，承载语音、视频和数据等业务，具有投资少、建设速度快并且无需室内布线等特点，比较其他通信方式有明显的优势。

与其他通信方式相比，稳定可靠的电气特性使得电力线成为最稳定和最广泛的网络系统。电网故障率在所有网络系统中最低，即使在线路出现故障时，电力线网络也能很快恢复。防火、防盗等安防监控设备利用 PLC 电力线永久在线的特点，可以同时接入电网中；PLC 支持家庭联网，随着技术的发展将成为家居自动化的生力军；面向用户的 IP 电话服务和高速 Internet 访问服务已经能够通过高速 PLC 提供，并向用户提供电话服务和面向上网服务的新选择，为逐步实现话音、视频、数据和电力“四网合一”打下坚实的基础，未来能创造更大的社会和经济效益^[2-4]。同时，PLC 技术还可以提供需求管理和全新负荷控制方法，提高电力部门的管理水平。

虽然 PLC 技术具备各种优点，但是与传统的计算机网络和公共电话网专用数据通信网络相比，电力线通信技术存在几个亟待解决的问题。

（1）随着网络中负载情况变化 PLC 网络中节点之间的通信距离也随之变化，以及电力线信道上的噪声变化，这将导致 PLC 没有明确范围的可靠通信距离和优良的通信质量。

(2) 在经过电能表以及电力线信道的传输信号存在非常大的衰减, 并且通信速率也会受到大功率负载接入的影响。

(3) 电力线通信网络源点和终点之间存在多径传输特性, 这将导致 PLC 的符号间干扰增大, 频谱有效性降低。

(4) 现有的 PLC 通信协议, 以最差时的信道状况为依据, 设计调制和编码方式, 所以数据帧冗余, 频谱利用率低, 当信道具有较大干扰时, 通信速度陡降。

总之, 不同的信道特性和物理连接等导致低压配电网中通信链路具有多径的频率衰落特性和复杂的噪声干扰, 将影响电力线通信网络的可靠性和有效性。这对电力线通信的关键技术提出了更高的要求, 在抗衰落和噪声干扰的同时, 尽可能提高传输速率。

1.3 AMI 系统研究现状与发展趋势

传统上对电网用户侧的电能量采用人工抄表方式, 不仅耗费大量人力、物力, 效率低下, 而且存在错抄、漏抄和抄表周期长的问题。随着计算机技术和通信技术的发展, 20 世纪 90 年代以来, AMR 在国内外得到广泛应用。AMR 可将安装在用户侧电能表所记录的电能量数据以定时方式通过数字通信网络传输到电网企业侧, 代替人工抄表, 可以看作是 AMI 的前身。随着电力企业对负荷管理需求的不断增长以及对需求侧管理的加强, AMR 的缺点如下:

(1) 需求侧管理系统已经基本满足了实用化要求, 可完成对专用变压器用户、大型一户一表社区低压用户的集中抄表, 并能将表码转入营销管理信息系统计算电费, 随着需求侧项目的推进, 以及大型居民社区低压集抄改造项目的进展, 可以预计未来 3~5 内, 专用变压器用户、一户一表社区低压用户的集中抄表问题将得到较大程度地解决。但是, 由于低压集中抄表通信技术的限制, 并考虑到安装成本和施工复杂度等问题, 尚不能在用电环境复杂的低压用户群体中推广。

(2) 电力公司仍然采用人工投递电费清单的方式向客户发送电费信息, 随着社会的发展和客户数的激增, 这种方式成本越来越高, 也与现代管理理念相背离, 迫切需要开辟多种渠道向客户提交电费信息, 降低抄表人员的劳动强度, 充分解放生产力。

(3) 对居民用户的欠费停电主要采取三种方式: 一是拔插或断开低压断路器, 二是剪断电源线, 三是拆表。这三种方式都需要抄表员上门处理, 成本高, 效果差且缺乏全过程监管, 迫切需要提供新的技术手段, 解决远程控制居民电能表的停、送电问题。

为克服 AMR 的不足, 实现供电方与用户之间的双向数据交互, 进而有效实施分时电价, 加强需求侧管理, 实时检测电网运行状况和电能质量, AMI 技术应

运而生。AMI 是一套综合了多种技术与应用的集成解决方案,利用双向通信系统和能记录用户详细负荷信息的智能电能表,可以定时或即时取得用户多种计量值,因此是智能电网的主要组成部分^[5]。

AMI 概念一经提出,便引起各国研究人员和相关机构的广泛关注。由于 AMI 在需求响应和节能降耗方面所具有的巨大经济和社会效益,欧美国家电力公司开展了大量实践工作。由于体系的复杂性和每个国家电网结构和分布的不同,各国对 AMI 研究的重点不同。美国希望 AMI 标准能够提高电网的安全性和稳定性^[6],欧洲支持有益于温室气体排放和能源的可再生和可重复回收利用的 AMI 标准。

2005 年,加拿大安大略省能源委员会规定其所辖电力公司对该省 500 万用户安装智能电能表。美国政府在 2005 年颁布《能源政策》,其中明确列出“智能量测”条目,规定电力企业应针对不同用户要求提供分时阶梯电价服务。法国和意大利电力公司通过安装智能电能表,支持用户实时跟踪用电情况和远程控制用电负荷。

2009 年 5 月,SG3 会议在美国召开,明确提出构建坚强的智能电网,支持交互通信方式,包括电力生产、传输、变电、分配和应用所有方面,整合了电、信息和业务流^[7,8]。我国也快速推进智能电网和 AMI 建设,国家电网公司开始建设涵盖大中型专用变压器用户、一般工商业用户和居民用户在内的三相用电信息采集系统,包括系统主站、通信信道、采集设备和智能电能表等,其中智能电能表占据投资主体。我国电力研究机构和天津大学等高等院校设置了智能电网研究中心,开始研究和探索 AMI 体系^[9,10]。

总体来看,现阶段国内市场上 AMI 建设正处于起步阶段,应用于水、热、气及电能源系统的自动抄表方案仍然局限于单载波 PLC 系统。如中慧自主研发的单载波电力线通信芯片技术,正在山西、河南、广西和云南等电网公司大批量推广应用。但单载波窄带 PLC 产品通信速率过低,无法采用高效的路由算法和灵活的信道接入控制机制,无法解决所谓通信上的“信息孤岛”^[11]问题,这是在电力线载波通信技术应用过程中发现的。这既掣肘电力线载波通信长远发展,也制约了电力线载波抄表系统向国际推广的步伐。而且,近年来基于正交频分复用(OFDM)技术的窄带高速 PLC 通信标准逐渐推出,技术相应成熟,这为 AMI 的发展提供了机遇和挑战。

1.4 PLC 技术研究现状与发展趋势

1.4.1 PLC 技术的研究动态

对于 AMI 系统的 LAN 网,由于智能终端下辖多台智能电能表,并且与每台

电能表的距离和通信时间不固定,考虑利用现有的电网进行数据通信,不需要重新铺设专用的通信通路,投入少;并且电力线通信不会像有线的方式被密集建筑物所阻挡,从而减少安装和维护费用,可靠性高,所以采用低压电力线载波通信方式进行数据传输。

电力线最初设计是用来在 50~60 Hz 频率范围传输电能,所以作为信息传输媒介进行数据或语音传输的通信通路,低压配电网络^[12]具有频率选择性衰减、阻抗不匹配导致的多径衰落和噪声:一方面电力电缆所面临的频率选择性衰减随着频率的升高而增加,从而严重影响通信距离;另一方面,考虑智能电能表功耗相关标准 IEC 62052-11、IEC 62053-21 和低压电力装置上的信号传输一般要求 EN 50065-1^[13],高频段传输电力信号在功耗限制下,受衰减影响,通信距离有限,而电磁干扰增加,所以现有应用于智能电能表的载波通信技术均限制在窄带。

利用电力线进行通信早已有研究,在 20 世纪 20 年代,瑞士工程师就研究了变电站、表计和负载之间的控制。在第二次世界大战期间,一些无线电爱好者尝试 PLC 试验,但他们通信频率选择射频频段,通信受限。1954 年,美国电气工程师机构(American Institute of Electrical Engineers, AIEE)发表了《Guide to Application and Treatment of Channels for Power Line Carrier》报告。此后,对 PLC 展开了大量的研究工作,并在 20 世纪 80 年代引起研究者的兴趣,在 90 年代得到关注,并且进入了产品的实用阶段。目前,已经应用此类设备在从美国佛罗里达直到加拿大西北部的许多地区,大约 75 万台相关设备被安装。韩国的 Xelne 公司,基于 PLC 的产品和家庭网络应用解决方案,从事开发、制造和销售。为解决通信最后一公里问题,实现文件共享、家庭联网和音频数据传输,该公司推出相应 PLC 产品。在 PLC 技术研发以及相关产品的研制上做了大量工作的国家和地区还有欧美、日本、以色列和新加坡等。

我国研究 PLC 技术起步较晚,但发展速度较快。早在 2001 年 5 月,国家信息产业部就正式批准了国电通信中心的 ISP(互联网业务提供)业务申请。据报道,中国电力科学研究所和福建省电力试验研究院相继研制成功了高速电力调制解调器,华中科技大学、清华大学和西安交通大学等高校和科研单位也对此进行研究,取得了一定的成果^[14,15]。但载波通信的具体实现是大多数研究主要侧重的,局限于 PLC 产品的扩展开发,主要利用国外已有的 PLC 方案或者 PLC 芯片。而针对国内配电网的信道特性所进行的调制技术的具体深入研究还不够,所以无法从根本上解决在国内配电网实现高速 PLC 所遇到的具体问题。

1.4.2 电力信道的研究动态

电力线最初设计并不是用来通信,所以信道传输特性复杂,并存在非高斯分布电力噪声^[16]。又因为电磁兼容(Electromagnetic Compatibility, EMC)和低压

电力线通信终端的标准限制,其信号发射功率受限。PLC 调制信号在电力信道传输,可等效为 N 个并联有记忆加性信道。加性记忆连续信道容量^[17]如下

$$C_N = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{(\nu - \lambda_i)^+}{\lambda_i} \right) \quad (1-1)$$

式中, C_N 为第 N 个子信道信道容量; ν 为每个子信道可分配的最大功率,为定值; λ_i 为子信道噪声功率, + 的意思是不能取负值。

若信号的发射功率为 P , 则每个子信道分配的实际功率应满足式 (1-2)。

$$\sum_{i=1}^N (\nu - \lambda_i)^+ = P \quad (1-2)$$

根据式 (1-1) 和式 (1-2), 要得到最优的信道容量, 基于电力信道特性分析和建模的基础上, 本书主要研究如何抑制电力噪声, 并尽量提高信道的传输性能。

电力信道的研究主要集中于传输特性和电力噪声。经典的电力线传输特性研究是 Zimmerman, 经过大量的试验测试, 应用统计的方法描述电力线非均匀传输模型^[18], 是一种自顶向下的设计, 充分考虑了信道的多径效应、频率选择性衰落以及传输线路的距离等因素。其后的研究多基于 Zimmerman 模型, 并重点研究其传输线参数的确定。W. Linyu 基于多导体传输线理论, 提出了推导这些参数的实际测量方案^[19], 通过设计与衰减时延等参数相关的具有多径和耦合传播模式的限集三芯电缆, 测量采集相关数据, 以得到相同电缆的传输特性参数, 由于需要搭建测试网络, 因此不太实用; D. Sabolic 提出了获得 5~30 MHz 宽带分布电缆高频参数的实用方法^[20], 在实际电力环境的多终端分布网络, 从某一电缆终端测试点采集得到反射系数, 其他终端按要求开路或短路。该方法较好地描述了宽带电力线的信道特性分布, 但对其他终端有开路或短路的要求, 试验结果与实际环境还存在偏差。

电力噪声的非高斯分布, 使其建模相对困难, 文献[21, 22]的噪声测试表明, 不同电网上的低压电力线噪声强度是有区别的, 并且具有时变性, 很难直接定量其大小, 但噪声也具有一定的规律性: 噪声随频率的增加呈下降趋势, 不同噪声成分具有叠加性。考虑这些特性, H. Meng 建立了宽带电力线频域噪声模型^[49], 主要是背景噪声和脉冲噪声的叠加, 背景噪声用 Nakagami-m 模型拟合, 脉冲噪声利用噪声源频响函数模型, 因为噪声源频响函数很难确定, 所以这种模型不太适用于电力线通信网络; Nikoleta 给出了包含背景噪声、窄带干扰和脉冲噪声的频域模型, 但是在此模型中, 脉冲噪声没有明确的数学描述。

1.4.3 电力噪声抑制方法的研究动态

低压电力信道具有复杂的噪声干扰和频率选择特性, 并存在大量的脉冲噪声。

为了提高系统传输率,必须对噪声进行抑制。噪声按其分布特性可以分为两种:平稳分布的背景噪声和非平稳分布的脉冲噪声,并且具有叠加性。目前对电力噪声的抑制主要考虑脉冲噪声部分,传统的多载波电力噪声抑制算法主要采用时域非线性限幅/消隐方法(Clipping/Blanking)^[23],在OFDM解调之前完成,利用脉冲噪声功率谱特点,设置适合的限幅和消隐阈值,当接收信号落入阈值内时,修改信号的幅度,相位不变,这种方法实现简单,但是当接收到的有用信号落入阈值内时,会破坏甚至阻断接收;Zhidkov提出一种在OFDM解调之后的基于频域的脉冲噪声抑制方法,将解调和均衡后的含噪信号变换至频域,通过解映射和插入导频构造纯净信号,并通过与含噪信号的减法,得到频域噪声谱,并将之变换至时域,利用脉冲噪声幅值特点对其进行峰值检测,最后再变换至频域进行消除噪声,这种方法与传统的限幅/消隐方法相比,噪声抑制性能优越,但是因为要做两次FFT(快速傅里叶变换),所以算法复杂度高。

对于平稳分布的背景噪声,通过检测符号分组的到来,利用消除算法进行抑制。所以抑制噪声的同时,实际上是检测符号的过程。文献[24]提出一种应用于G3终端的MMSE-LSA(Log-Spectral Amplitude Minimum Mean-Square Error Estimation,对数谱幅度最小均方错误)背景噪声消除算法,对通信过程中混进的各种语音噪声具有一定的抑制能力,但限制于窄带;Bilik在线性非高斯问题中研究了连续贝叶斯估计问题,提出了基于MMSE的高斯混合卡尔曼滤波^[25],能够更加精确的滤出非高斯系统噪声和测量噪声;电力线通信中符号分组的检测也有很多方法,Bastidas提议根据符号和交流电相位间的相关性,利用一定的辅助机制来检测符号,例如过零检测器。但是这种方案并不实用:一是电网中不可避免会出现交叉相位,这时交流电相位不清晰,需要附加的技术解决;二是过零检测器是一种外加的硬件机制,增加了系统成本。所以直接利用下行接收机信号来估计符号定时比依赖交流电相位更加适用。之后研究者提出采用插入前导序列方法进行符号同步。David Cooper提出用一种二进制单极性伪随机序列作为前导序列,G3-PLC的前导序列,在频域产生且相位固定。前导序列符号同步是利用其周期延时相关性来检测数据分组的起点,在高斯白噪声的环境下,该算法可以较好地实现分组检测,但是在非高斯的电力噪声干扰下,判决变量 M_n 由于受到信道中较大随机噪声的影响而超过预先设定的阈值值,从而产生误判。因此,利用线性KLT(Karhunen-Loeve Transform,卡-洛变换)分解及主元分析方法检测符号分组,并抑制背景噪声。

1.4.4 自适应基带映射方法的研究动态

目前在低压窄带电力线通信标准中,基带映射方式常使用相对相位映射方式,如在IEEE 1901.2、ITU G.hnem、PRIME和G3^[26]中选择DBPSK(差分二相移相键控)、DQPSK(差分四相移相键控)和D8PSK(差分八相移相键控)映射方式。

这种方式在消除因绝对相移导致的“倒相问题”^[27]的同时,可采用两种方式解映射——相干检测和差分检测,前者在理论上虽然拥有更好的性能,但是因为避免了复杂的载波提取过程,后者接收端的难度降低了。如何弥补差分检测性能上的差距,国内外学者对此进行了大量的研究^[28,29],其中一种提高系统性能的方法是解映射和译码联合处理。利用信号在编码、映射过程中产生的相关性以及信道信息,这种方法以判决概率比的“软信息”形式在接收端各模块间流动,适于软判决联合处理的星座映射方式。

之前对动态比特分配方法的研究主要针对无线 OFDM 通信技术。Hughes-Hartogs 提出的注水方法是重要基础性的 OFDM 信道容量优化算法,其算法的核心是利用 OFDM 电力信道的选择性和子载波信道的平坦衰落特性,在信道增益较大的子载波上分配更多的传输功率,从而优化 OFDM 的数据传输量,以接近选择性衰落信道的信道容量;Zhang 和 Leung 研究了一种基于贪婪原理的功率分配方法^[30],该方法循环地将传输功率和比特分配给拥有最高效益值的 OFDM 载波,直至某约束无法满足为止,同时在单用户 OFDM 系统发射功率较高的情况下,可以使得系统信道容量接近最大,但是复杂度很高;Nan 在此基础上研究了一种多用户的自适应功率分配方法^[31],源和终点按时隙分配子信道,相邻时隙两个子信道配对,使子信道对的聚合功率最小,以达到最优信道容量的目的,因为考虑了子信道配对和子信道功率分配,所以复杂度也很高;为了在 OFDM 系统中取得复杂度与性能的平衡,Bansal 等采用二分搜索法来逼近拉格朗日算子的最优值^[32],该拉格朗日算子是 OFDM 系统子载波中以该载波上的功率作为参数的比特数量函数表达式的倒数,但是,在每一次二分搜索过程中,如果预测的拉格朗日算子最优值的范围太广,也会导致该方法的循环次数过多。

我国主要以高校为主体,并在政府和企业资助下对电力线载波通信技术进行研究,目前在电力信道特性和 OFDM 关键技术的理论研究上均有所突破。例如:华北电力大学的“面向智能电网的中压电力线通信关键技术研究”提出了中压传输线电气参数测试方法^[33],并选取典型环境完成相关测试,在对中压电力特性充分了解的基础上,提出了 10 kV 电力线载波通信自动组网算法^[34];某电子科技大学的“高速移动 OFDM 系统基于波动性分解模型的信道均衡方法研究”提出了一种增加纵向检验的 LDPC 码用于联合判决-反馈均衡的载波频域均衡方法和双滑动窗的信道冲激响应检测算法,从而提高 OFDM 系统整体的性能;重庆邮电大学“复杂调制直接序列扩频信号的盲检测与估计研究”针对多径衰落信道下正交频分复用信号调制识别难题,提出基于循环自相关的 OFDM 信号调制识别方法,并发明了一种基于时频变换的 OFDM 信道估计方法。

作者一直从事低压电力线载波通信的相关研究,前期构建了真实电力信道的测量环境,采集并分析了测量数据,并由此得到了信道特性参数的统计分布;根

据信道特性,并获得入网方法发明专利;在针对噪声抑制的研究方面,提出了用于抑制背景噪声的 MMSE-LSA (Log-Spectral Amplitude MMSE-STSA) 方法^[35]并发表相关论著^[36,37];在 OFDM 信道容量优化的设计方面,基于单一的基带映射和星座图分布方式,申请了适于动态比特分配的星座映射方式的发明专利,在提高可靠性的前提下,利用各子载波噪声方差信道估计值,在误码率 (BER) 的约束下,动态分配每个子载波的功率,以使信道容量最优,并获得 AMI 系统载波通信模块自适应调制和编码方法的发明专利。

1.5 本书的主要内容安排

现有窄带 AMI 电力载波方案在设计物理层技术时,均以最差时电力环境为依据,每个子载波采用相同的基带映射方式,当某些频率子载波干扰严重时,采取关闭这些子载波的方式,提高通信可靠性,这显然会降低通信速率和频带利用率。又因为仅凭前人的研究和理论推导建立的信道模型是否能代替真实的环境,特别是我国国内的电力线环境,不足以令人信服,也不够可靠,而脱离国内电力线实际环境的系统级应用的 OFDM 技术的研究和评价也没有太多实质性的意义,所以,本书主要研究如下关键技术。

1. 基于电力信道特性的窄带信道建模

为采集窄带电力信道中的衰减、阻抗、多径及噪声等,设计电力信道测量系统,应用 Zimmermann 模型对电力信道传输特性进行建模,以得到可调衰减和多径的信道传输函数。记录并分析测量噪声,从中统计分析背景噪声的功率,脉冲噪声的宽度、间隔和包络的分布,利用这些特性参数建立功率和脉冲率可调的电力噪声随机模型。根据实际测量数据和马尔科夫链蒙特卡罗 (Markov Chain Monte Carlo, MCMC) 分析法比较评估电力线模型。

2. 窄带电力噪声抑制方法研究

窄带电力噪声包括平稳分布的背景噪声和非平稳分布的脉冲噪声,在 9~95 kHz 频带,两种噪声叠加存在。背景噪声的瞬时功率远低于脉冲噪声,但是存在的时长远高于脉冲噪声。噪声抑制问题即对宽带的平稳和非平稳噪声进行抑制。对于背景噪声,因为具有平稳性,所以对其采用 KLT 主元分析的方法进行抑制,分解噪声和信号特征值和特征矢量,并利用主元滤波的方法确定数据的起点,在不增加数据冗余的前提下,能够更精确地检测数据的分组情况;对于脉冲噪声,因为其突发性,并且在出现的位置具有大的能量,所以采用改进的时域非线性 Clipping/Blanking 方法进行抑制。

3. 提出最优传输率自适应基带映射方法

针对现有标准 OFDM 系统,所有子载波使用相同比特分配方案和硬判决解调