

85-89

电力线通讯技术研究述评^{*}

On the Power-Line Communication: An Overview

黄荣辉 周明天[✓] 曾家智

(电子科技大学 成都 610054)

TM73

Abstract This paper briefly describes the history of power-line communications and gives the developing phases. The key technology in power-line communications has been discussed in detail. The paper also summarizes the applications on power-line communications. In the end of the paper, it puts up the difficulty and problem in developing power-line communications in China.

Keywords Power-line Communications, Computer-network, Spread-spectrum

1 引言

电力线通讯指利用电力线为传输介质实现数据通讯和计算机联网。通过电力线传递数据已有近百年的历史^[1]。早期的电力线通讯技术采用高压电力线载波,在点对点通讯的两端电力线上装有阻波器。如德国在1928年开发了“电力线载波通讯(PLC)”技术,1930年,西门子公司开发出一种称为“Telenerg”技术,这是一种多频处理技术,在280~600Hz的频率上重叠脉冲。1935年,德国 AEG 公司研制出“Franskoomando”方法,即对电网电压进行调幅,信息传输采用时分多路复用。1935年以后,具有时分多路复用的单频方式开发成功。

进入九十年代以来,随着集成电路技术水平的提高,具有抗干扰优势的扩频通讯技术也迅速得到发展。利用扩频通讯技术使电力线通讯进入了数字通信时代。目前国内外有许多公司和研究机构正在进行有关电力线通讯技术的研究,美国 Adoptivenetwork 公司 AN1000CS 芯片组,只需加上时钟、强电隔离模块即可构成电力线通讯卡件,其与计算机之间有串行、并行和同步接口。日本 Busycom 公司已使用该芯片生产出电力线调制解调器,通讯速率达到100kbps。美国 Intellon 公司研究出了适用于电力线的扩频数据通讯芯片,这种芯片的特点是符合 Cebus 标准。德国 Ascom 公司和 RWE 公司着重对电力线电话进行研究,研究结果表明:电力线通讯能作为本地市话网的补充,还能提供与电力供应相关的服务。在利用电力线进行 Internet 网接入的研究方面,当属英国 NORWEB 公司最为出色。

1991年,英国联合电力公司的子公司 NORWEB 通讯公司开始寻求对电力线进行扩频载波通讯。1995年,该公司与加拿大北方电讯公司合作对英国曼彻斯特的20户居民住宅进行了电力线通讯实验,试验包括用电力线进行话音传递,结果非常成功。此外,这两家公司又在美国和澳大利亚不同的电网上成功地完成了电力线语音传递试验。1997年10月,这两家公司声称已经解决了电力干扰等问题,取得电力线载波技术的重大突破,利用新开发的数字电力线(DPL)技术实现了在配电线路上进行高速数据传输和互连网接入,从而将四通八达的配电线路转化为信息高速通路。1998年3月25日,成立合资公司,进行该技术的市场推广。

国家电力公司所属的南京自动化研究院和北京电力科学研究院都正在从事电力线通讯技术的研究。南京自动化研究院着重研究利用10kV 配电线路进行数据通信,其特点是速率低(数10kbps),距离长约10公里,适合于配网自动化系统数据传递。北京电力科学研究院着重研究利用220V 低压电力线进行 Internet 接入,其特点是速率高(数 Mbps),距离限于建筑物内。

1998年7月,国际电力线论坛(IPF, International Powerline Forum)在西班牙首都马德里宣告成立^[2]。IPF 代表着那些致力于开发利用电力线通讯资源的电力公司、制造商和信息服务公司等,它对于当前电力线通讯技术的开发和应用具有前导作用。IPF 的目标是:在技术开发、标准化、商业化和法规化方面,通过国际间合作和营造有利环境,开发和应用具有商业价值的电力线通讯系统。

1999年5月,IPF 在布鲁塞尔召开国际会议^[3],会

^{*} 本课题得到四川省重点实验室资助

议就电力线通信技术的研究范围进行了热烈的讨论。目前电力线通信研究主要包括技术研究、商业效益研究和政策法规研究三个方面。技术研究主要指电力线通讯的信号技术(包括载波、扩频载波、通讯速率、信道带宽、通信可靠性等)、协议技术(包括物理层、数据链路层、应用层协议、服务质量等)、电力电缆制造技术(电力电缆的通讯特性、电力电缆与通讯电缆的性能比较、电力电缆的无线发射等问题);商业效益研究主要指电力线通信的应用范围、市场前景;政策法规研究主要指电力线通讯中涉及到的法律问题,例如电力和电信部门的关系、电力线通讯高频辐射对环境的影响。纵观电力线通讯技术的发展过程,可将其划分为如表1所示的两个阶段。

表1 电力线通讯技术的发展阶段

阶段划分	载波通讯阶段 (1920~1990)	数字通信时代 (1991~现在)
信号方式	模拟	数字
通讯体制	非扩频载波	扩频载波、高频调制
传输介质	高压传输网	中、低压配电网
传输速率	50~2400波特	1k~1Mbps
通讯方式	点对点	点对点及网络
典型应用	远动及调度载波电话	自动抄表及互连网接入

2 电力线通讯的关键技术

综合分析当前国外电力线通讯状况,其关键技术难点主要集中在物理层和数据链路层。在物理层,如何采用先进的扩频技术和高频调制技术是其关键;在数据链路层,具有电力线特征的介质争用协议及其数据帧结构也是其关键。

按照计算机网络 ISO 七层协议模型,电力线通讯的最重要环节应当是物理层的信道特性及其调制方式和数据链路层的协议。本节着重讨论电力线的信道特性,然后介绍已在电力线上成功使用的扩频通讯技术,特别是在英国成功应用的高频调制技术,最后简要介绍当前在电力线上使用的链路层协议。

2.1 信道特性

通讯信道的阻抗、信号衰减和噪声是设计通信信号方式、错误控制码和通讯协议的基础。电力线的基本用途是电能供给,因此当作为通讯介质时,它与其他专用的通讯介质有着完全不同的信道特性。

2.1.1 低压电力线的噪声 测试表明^[7],建筑物内电力线上的噪声依赖于当时连在电网上的用电设施,其噪声源有:交直流电机、可控硅设施、电视机等。此外,质量低劣的电力线漏电和放电也会产生许多噪

声,电力线上的噪声可归纳为如下四种。

(1)与电网频率同步的谐波噪声。这类噪声是由电网中各种可控硅开关部件在50Hz及其谐波频率点产生的周期性噪声,它与电网频率同步或略有偏移。

(2)具有光滑频谱的噪声。主要由各种交直流电机的碳刷通断产生的噪声,其频率取决于电机的转速而不是电网频率,这种噪声可看成白噪声。

(3)脉冲噪声,主要来源于照明电器、热工仪表及其它可能产生脉冲干扰的开关。

(4)非同步的周期性噪声。这是一种与电网频率成线性非相关的噪声。最典型的噪声源是电视接收机所产生的水平扫描频率的谐波频率。

居民楼的噪声源主要有:居民住户内的各种电气设施;连接在同一配电变压器的邻居家的各种电气;从配电变压器初级端或其他电磁辐射进入的背景噪声。

2.1.2 信号衰减 电力线上信号衰减与负荷、时间、信号频率、测量点等因素有密切关系,不同的建筑物体现了不同的负荷类型,工业建筑比医院、公寓、单家独户等民用建筑有更恶劣的信号衰减,以单相测试为例^[8],在140kHz时,医院建筑电力线的信号衰减与工业建筑相差5db,在160kHz时陡然相差达到20db,240kHz时缓慢达到27db,在不同的时间,同一测量参数有不同的衰减特性,例如午夜与白天比较,居民住宅的信号衰减其差值高达20db。当信号频率增加时,衰减趋于增大,但并不成单调关系。表2说明在50、120、200kHz时的信号衰减状况。测量点的不同体现在单相中不同距离和跨相测量,一般来说,相内衰减明显高于相间衰减。

表2 低压电力线信号衰减情况(相内测量,分贝)

	50kHz	120kHz	200kHz
工业建筑(白天)	20.8	25.7	46.9
工业建筑(晚上)	18.7	25.6	39.6
医院	5.6	6.2	23.9
公寓	8.4	15.8	20.6
单家独户	2.3	3.9	4.2

2.1.3 电力线的阻抗 电力线作为整个电网的一个部分,其通讯阻抗是有源内阻。最为广泛的测量数据要数 IBM 提供的住宅电源阻抗测试报告^[9]。IBM 对20kHz至300MHz频率范围的25个频点进行了测量。测试表明,电力线的阻抗具有相当宽的变化范围,例如在100kHz时,最小值为4欧姆,平均值为14欧姆,最大值为32欧姆。居民住宅的电源插座的阻抗主要取决于电力线上的用电设施和配电变压器的内阻。配电变压

器的内阻随信号频率而变,并且是感性阻抗,100kHz时配电变压器的阻抗为7~18欧姆,并有77~85度的电感性角,变压器到用户的线路电阻大约有1~3欧姆,这与线路长度有关,并与连接到变压器的用户数有关。

总之,阻抗、衰减、噪声是电力线通讯的三个基本特征,不同于一般的通讯介质,电力线的阻抗特性具有随频率而变的动态阻抗特性;电力线频率特性受介质材质和形状的影响而具有较窄的载波频率;电力线的噪声特性因各类电力负荷发出的脉冲干扰和谐波干扰,具有随时间和频率而变的动态噪声特性。

针对电力线的特殊的信道特性,目前国内外采用了多种信号调制技术:第一种是最早使用的高压输电线载波调制,第二种是配网线路扩频载波调制,第三种是低压准同轴电缆专用的高频调制。文[6]认为,较大的衰减变化量意味着信号电平的调制信号也将产生较大的衰减,从而不适合于电力线通讯,虽然可以设计最差衰减情况的传输信号电平,但势必增加调制解调器的功率、成本和发射不期望的电平,采用数字数据通讯的另一种技术就是采用差错控制码和允许信噪比有变化的通讯协议。在这种情况下,ARQ 差错控制方式能保障信息流量比率,自动调节通道性能,数据传输速率也可通过变动检测位和接收端的信噪比电平来进行改变,而不需要改变信号带宽。另外,当信噪比低于某一门限值时,也可以对数据传输率直接进行改变,但这种方式将改变信号带宽。扩频通讯技术是保障信号频谱独于数据速率和抗窄带信号衰减的有效方法^[10-11]。

另一种抵御严重衰减的方法是使用中继器^[12]。由于衰减和频率有关,在发送端和接收端使用可选择的频率也是很有用的,这需要使用多频接收器。

与衰减相反,噪声却随着频率的增加而减少^[13],从而信号频率就卷入了平衡噪声和衰减的矛盾之中。由于噪声和信号源都会遇到衰减,靠近接收端的信号源具有较大的信噪比,特别是衰减较大时,这种特征会影响到信号频率和其他数据传输参数的选择。在某些应用中,避免将接收设备放置在靠近噪声源的地方,当信号逐渐变弱时,数字信号将遭受突发性错误干扰。

2.2 电力线扩频通讯

扩频通讯是提高通信可靠性和实现加密通讯的有效手段^[5,12-14]。传统非扩频电力线通讯只能以很低的速率通信,采用扩频通讯后,可避开电力线上脉冲干扰。目前实现扩频有三种途径:直接序列调制、跳频载波和利用 Chirp 扫描频率进行载波。直序扩频因其同步时间长致使电力线上数据传输常常因脉冲干扰而中断;跳频技术因其实现的难度和成本,过去一般只在军事中用于航海通讯的加密通讯,由于集成电路技术的发展,利用扫描频率的 Chirp 进行载波,是一种适合于

载波侦听多路访问(CSMA)网络的扩频技术。Chirp 是一种非常短的直序扩频模型,与传统的直序扩频方式比较,它能有效地扩展信号能量到一个更宽的频率范围,美国 Intellon 公司成功研制出一种基于扫描频率(Chirp)技术的集成电路芯片。这种芯片采用了 Cebus 标准,单位符号时间(UST)为100ns,信号频率范围为100kHz~400kHz,有效数据速率为10kpbs。图1是电力线 Chirp 的频谱图,从图上可以看出,信号的幅度明显地随着信号频率的改变而变化,这是因为电力线的阻抗有随频率而变的特点。理论上,扩频信号的处理增益等于频谱带宽除以数据带宽,其比为30:1,即处理增益为 $10\lg_{10}30=14.8\text{dB}$ 。

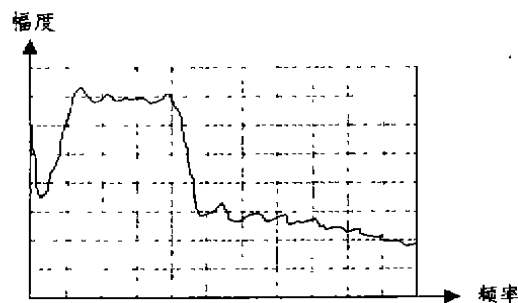


图1

2.3 高频调制

高频调制配电网(HFCPN, High Frequency Conditioned Power Networks)^[3,11]是由英国 NORWEB 公司研制开发的数字电力线技术(DPL, Digital Power Line),HFCPN 不受传统标准束缚,在分析英国配网电力线传输特性的基础上,发现线路的阻抗以30~70欧姆的平均值周期性地随频率而变,在某一固定的阻抗点能为高频信号有效稳定地传输提供最优的环境,英国的这种电力线是一种准同轴电力电缆,DPL 技术就是对这种电缆进行高频调制,同时传输两路以上的信号而不产生互损。这些信号的频率很宽,从50/60Hz到500/600MHz。高频调制网络的基本结构如图2所示。

图中,调制单元(CU)具有以下功能:①安全、有效的信号互联,频率大于1MHz;②大于1MHz的信号定向传输;③一个高于1MHz的噪声基;④大于1MHz用户的分隔;⑤供电和通讯服务端口;⑥电网的最优频谱性能。之所以选1MHz为最低频率,是因为在该频率下,可装设的方向耦合器比较经济、有效,而且物理尺寸合适。

DPL 技术的实现需要四种硬件装置:

(1)DPL1000主站(位于中心变电站),是一个数据开关,与主干网络相连,提供高级网络管理的兼容性和连接性。

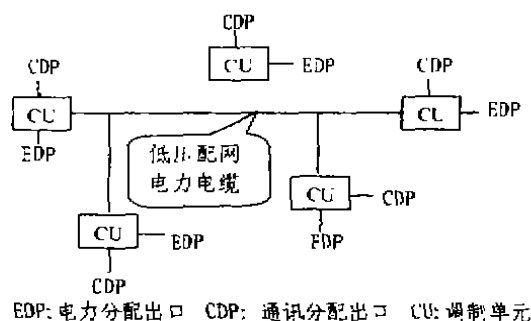


图2

(2) DPL1000基站(位于各变电站),向上通过标准远程通讯技术与主站相连;向下通过机箱内的若干线路卡与本变电站的各配网出线相连。

(3) DPL耦合单元(安装在用户电表的旁边),它一端接用户电表的进线,另一端连接同轴电缆。

(4) DPL1000通讯模块,一端接同轴电缆,另一端接PC机、电视机、游戏机等。

2.4 电力线通讯的数据链路层协议

应用电力线通讯可实现计算机联网,对于电力线介质的计算机网络来说,其物理层和数据链路层协议有着与其信道特性相一致的性能。寻求一种适合于电力线通讯特性的链路层协议,主要有两点:数据帧结构和介质访问协议。根据对电力线上脉冲干扰发生间隔的分析,数据帧适宜取187个字节,远小于802.x的数据帧长度,这就是说电力线网络应当采用短帧,电力配电网线路具有总线及树型的混合拓扑结构,适宜于这种结构的协议有轮询、载波侦听多路访问(CSMA)及令牌总线。轮询方式容易实现,特别是软件结构简单,适宜于带选择的应用环境,但网络站点负载为非平衡时,轮询方式的效率较低,尤其在网络站点进网和退网频繁时,需要耗费许多时间修改轮询表;令牌总线方式在平衡式重负载下效率很高,但实现起来比较困难,在噪声充斥的电力线网络中,解决丢失的令牌是很困难的;载波侦听多路访问方式适宜于重负载网络,适宜于网络站点进网和退网频繁的情况,实现起来比令牌方式容易。

目前已经应用或正在研究的适合电力线介质的网络协议主要有三类:(1)工业控制网络中的协议,包括Echelon公司提出的LonWorks协议,该协议已被批准为国际标准;以及由EIA提出的Cebus,该协议已成为国际标准。(2)CSMA/PA协议。(3)令牌总线协议。

3 电力线通讯技术应用现状

早期的电力线通讯主要用于电力调度电话音频传

送。进入九十年代以来,特别是近几年来,电力配电网络数字通讯技术呈现出广阔的应用前景。

3.1 技术分类

从技术特点来看,电力线通讯可分为3类,如表3所示。

表3 电力线通讯的技术分类

技术分类	A	B	C
传输距离	几十公里	几公里	几百米
通讯速率	50~2400波特	1~10kpbs	10kpbs~1Mbps
通讯体制	非扩频载波	扩频载波	扩频载波,高频调制
信号方式	模拟	数字	数字
适用介质	高压输电网,35kV以上高压配电网	中压配电网、低压配电网(10kV~220V)	220V/380V 低压配电网
通讯方式	点对点	点对点、网络	点对点、网络
载波频率	40~500kHz	100kHz~500kHz	600MHz
主要应用	调度电话、远动数据	远程抄表、用户负荷管理	互连网接入、数字电话、住宅自动化

3.2 应用分类

按应用分类,已实现和具有应用前景的系统可列举如下:

(1)电力公司营运及电力用户管理,主要有:远程自动抄表收费系统;远程开关合/断;电能质量监督;电缆设施预测性维护;用户负荷管理;电力市场信息采集。

(2)电讯及信息服务,主要有:电力线模拟及数字电话;互联网接入服务。

(3)自动控制及住宅自动化,包括:建筑物安全监控系统;大型零售商场利用电力线实现收款机联网;家电设施利用电力线实现相互通信和操作。

3.3 应用范例

(1)远程自动抄表系统 西班牙最大的电力公司开发有远程抄表收费系统,这个抄表系统使用电力线进行通信,在每一个用户住宅都加装了一个脉冲生成器,用来将气、水、电表的转动转换为电子信号,信号通过低压电力线送到用户的显示装置,该显示装置再将这些信号所表示的数据送到一个可连接1024户的集中器,集中器的数据通过专用通信线路送到电力公司的用电营销部门。反过来,集中器向用户提供如下信息并显示在液晶显示器上:当前电费费用;每天各时段电价及超负荷电价;本次收费与上次收费的差值;高峰收费的日期和时间;该系统数据通讯速率为19.2kpbs,误码率为 10^{-5} 。

(2)互连网接入 德国 ASCOM 公司提出利用电

力线接入 Internet 网的解决方案。这个方案由独立的户外系统和户内系统两部分组成。户外系统完成户外主站和住宅连接点之间的通讯。户外主站通常安装在低压变压器端,住宅连接点安装在电表旁。所有住宅用户共享同一段低压配电线。室内系统将户外系统延伸至每个电源插座。室内系统可作为一个专用的局域网而不需要额外敷设导线,并可与以太网或 TCP/IP 计算机网络集成。进一步的现场测试已表明,利用电力线通讯可达到每秒数兆比特的传输速率,典型的传输距离为300至500米。

4 国内推广应用电力线通讯技术的策略、技术难题和应用前景

要在国内推广国外电力线通讯技术,尚有一些问题需要考虑:首先,欧洲国家的配电网末端变压器的配电线一般只接50个用户,而我国一般接200以上个用户;其次,欧洲国家配网线路采用的是准同轴电缆,而我国采用的是三相四线制的金属导线;第三,国外配电网线路多采用铜质导线,而我国多采用铝质导线。应当注重研究适合我国配电网的电力线通讯技术,从技术分类来看,应以中短距离的电力线通讯技术为主,因为中、短距离的电力线通讯技术市场广阔,其中很多应用场合不适宜敷设专用通讯线路。

尽管电力线通讯技术已走过近百年的历史并取得了丰硕成果,近几年来在电力线数字通讯方面也取得了突破性进展,但目前仍存在一些有待进一步攻克的技术难题。由于电力线网络的数据帧很短,使扩频通讯的同步机制非常复杂。高频调制网络只能用于配电网中特定的准同轴电缆,室内得有专门的同轴电缆,并有消息报道:由于频率过高,数字电力线技术对电网中其他用电设施形成高频辐射干扰。基于电力线介质的MAC层协议未形成与高层网络协议接口的国际标准,目前 LonWorks 协议和 Cebus 协议均自成体系,不能像802.x 协议那样与上面的 IP 或 IPX 接口。混合令牌环总线方式以及 CSMA/PA 协议并未形成国际标准。

展望未来,电力线通信技术有着令人振奋的应用前景。从速率来看,已有从数十比特到数兆比特的成功应用,因此不管是控制网络还是信息网络都能使用电力线通信技术获得所需的应用要求;从可靠性来看,电力线通讯可提供误码率小于 10^{-1} 且无需拨号的专线连

接;从经济上来看,由于电力线随处都有,无需重新敷设通讯线路,既节省线材费用,又不构成对建筑物(特别是已装修完工的建筑物)的损坏;从方便性来看,改变通讯对象(或网络结点)极为方便,提供了有线方式下无线通讯的位置灵活性。对于我国这样一个经济不发达、通讯条件落后的国家,开发利用电力线通讯技术是非常必要的。

参考文献

- 1 Power Line Communications World Congress. Available at: www.itr-conferences.com/powerline.html
- 2 History of Powerline. Available at: www.rwe.de
- 3 Brown Dr P A. Multi-Media Communications over Electricity Network. Available at: www.nortel/powerline/report3.html
- 4 Brown Dr P A. High Frequency Conditioned Power Networks, '95 UTC Annual Conf. Proc., UTC, Washington, DC, 1995
- 5 Radford D. New spectrum technologies enable low cost control applications for residential and commercial use. Available at: www.intellon.com/www.ascom.ch/art/htmldocs/polcar.html
- 6 Morgan H L. Attenuation of Communication Signals on Residential and Commercial Intrabuilding Power-Distribution Circuits. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1986, EMC-28(4)
- 7 Roger M V. Noise on Residential Power Distribution Circuits. Same to [6]
- 8 O'Neal J B Jr. The Residential Power Circuit as a Communication Medium. IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1986, CE-32(3)
- 9 Goodenough F. Chip set puts 100kbits/s of data on noisy powerline. IEEE Electronic Design, 1996(March)
- 10 van P K. Communication using pseudo-noise modulation on electric power distribution circuits. IEEE Trans. Commun., 1985, COM-33(Sept.): 964~974
- 11 Ochsner H. Data transmission on low voltage power distribution lines using spread spectrum techniques. Proc. Can. Commun. Power Conf., 1980, Oct.
- 12 Shwehdi M H. A power line communication interface using spread spectrum technology in home automation. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 11(3)
- 13 Lytle R. A new carrier current protocol utilizing an active repeater for consumer and industrial applications. IEEE Trans. Cons. Electron., 1985, CE-31(Nov.): 700~705
- 14 Rice B F. A multi-sequence spread spectrum system for powerline communications. IEEE 4th Intl. Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996, Part Vol. 2
- 15 Zhang zhengchuan. Lighting power supply line characteristics and performance an FSK discrimination detector. IEEE Teencon' 93/Beijing
- 16 Tanenbaum A S. Computer Network, 3rd Ed. 1997