

电力线载波通信耦合单元

比赛编号: BJ10014

日期: 2002-10-8

单位名称: 清华大学自动化系

作者: 徐海 Xu Hai

职业: 学生

电子邮箱: xuhai99@mails.tsinghua.edu.cn; seagive@sina.com

1. 摘要

本文介绍了一种实现电力线载波通信的线路耦合单元。本系统使用 Motorola MC56F805 DSP 芯片为核心, 运用新型的耦合技术和扩频技术原理, 设计了一种电力线载波通信耦合单元。关键词: 电力线载波, 扩频通信

2. 引言

近年来, 家庭网络技术不断发展, 智能家庭、智能大厦和智能小区相继出现。人们开始对数据通信速率和信息容量提出了新的要求, 希望能实现多媒体信号和其他高速数据信号在家庭网络中传输。同时希望, 能为多媒体点播、数字电视和其他宽带综合服务, 提供一种能使用的服务通道。

现代工业自动控制和计算机微处理技术的发展, 已经使家庭自动化从早期设想进入了应用环节, 特别是总线协议和集散控制使家庭自动化控制向智能化方向迈进了一大步。在数据通信介质方面层出不穷, 包括无线通信、红外线、光纤、同轴电缆、双绞线等, 但在实用上却出现了不少麻烦: 1) 如果再增加有线通信, 家庭网络对各家各户, 甚至每一房间提出了铺设通信线路的问题。铺线工程浩大, 同时有的居民楼已建成, 再在墙壁表面拉线, 居民难以接受。2) 如果采用无线方式, 还达不到较好的通信效果和较高的通信速率, 成本尚且很高。

于是着手考虑对电力线的利用。电力线载波 (Power Line Carrier, PLC) 是一种利用输电线路作为高频信号传输线路的通信方式。模拟技术用在电力线上传递载波信号, 很早就有了。已有的 35~500 千伏高压电力线载波通信, 只是电力系统生产调度和行政联络的通信方式。随着数字处理技术和通信技术的飞速发展, 电力线载波 (PLC) 倍受重视, 并迅速成为国内外电力线载波通信发展的主流方向。它利用现有交流电源线作为通讯线路, 把电力线通信技术、网络技术和微控制器相结合, 其优点是: 电力线和信号线合一, 直接利用住宅电力线作为控制总线 and 数据总线, 通过电力线将各控制器与各功能接口和设备相连, 实现程序控制和高速数据的传输。无须布设信号线, 人们原来使用和维护电器的习惯都不受影响。

低压电力线信道特点

电力线导线粗, 结构坚固, 可靠性高。但电力线是用来传送工频电能的, 所以在电力线的结构设计上不可能考虑高频通信技术的特殊要求。电力线上带较高电位, 不能直接接触; 线路上杂音电平也很高, 给组织高频通道带来一定的困难。

从技术角度而言，利用电力线作为传输媒介，主要存在着以下几个不利因素：

- 1) 脉冲噪声 (Impulse Noise)：是电力线上最大的噪声源。如：洗衣机、空调电机和日光灯启停瞬间。噪声具有突变、高能和覆盖频率范围广的特点，对载波信号影响很大。不仅会造成信号误码率升高，而且可能使接收设备内部产生自干扰，严重影响整个系统的工作。
- 2) 信号衰减和阻抗变化：由于家用电器启停随机性大引起，如：冰箱，易造成电力负载变化大，使得电力线阻抗可从 0.1 欧姆变到 100 欧姆，信号衰减从 55 dB 到 100 dB。
- 3) 持续谐波干扰 (CW, Continuous-Wave jamming)：如：开关电源，产生的主谐波频率在 50 kHz 以上。处于载波信号的频率范围。
- 4) 低压电力线路的拓扑特性较为复杂，而且与一般的无线、有线信道有较大的差异，尚无准确的模型描写电力线信道。

3. 设计原理

把电力线增加了作为传输介质的功能，那么，电力线载波通信属于网络通信的一部分。目前，网络的分层结构有两个重要的网络体系，即 OSI 参考模型和 TCP/IP 参考模型。

OSI 参考模型和 TCP/IP 参考模型都是基于独立的协议栈的概念，层的功能也大体相似。不过，TCP/IP 模型不区分（甚至不提及）物理层(Physical Layer)和数据链路层(Data Link Layer)。如图 1：



图 1. OSI 参考模型和 TCP/IP 参考模型

本系统要解决的是：电力线载波的底层通信，即设计和实现相当于 OSI 参考模型的物理层和数据链路层。这两层完全不同。物理层必须处理电力线和铜缆、光纤、无线通信的传输特点。而数据链路层的工作是区分帧头和帧尾，并且以通信需要的可靠性把帧从一端发到另一端。

电力线载波通信的物理层包括：电力线信号耦合、载波调制、扩频调制和多路载波的数据调制。而数据链路层主要包括介质访问控制层(MAC, Medium Access Control)。

通过研究双绞线通信和无线通信中的编码、调制解调、纠错技术，把有线通信中的多载波技术和无线通信中的扩频技术结合起来，实现电力线载波高速通信。即：

电力线载波 = 多路载波 + 扩频（直序和跳频）。

如图 2：

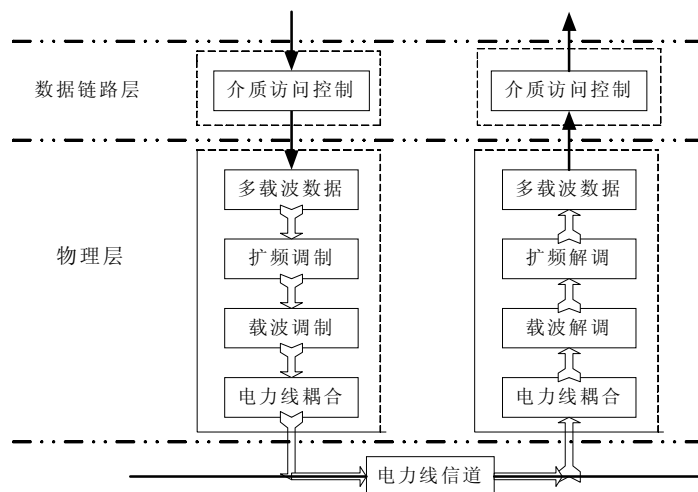


图2 电力线载波的底层结构

这样的设计是为了克服以下情况的不足：

- a) 已有的家庭网络系统中的电力线载波通信，仍然属于简单调制的单载波传输，不但传输速率不高，而且容易受到持续谐波的干扰；
- b) 运用多载波技术提高电力线通信传输速率的解决方案，因为不能很好地解决子载波正交和载波信号串扰的问题，所以，子载波中心频带之间分隔较开，子载波数少，带宽利用率不高。而且，再继续增多载波数量的潜力也受到了限制；
- c) 把扩频技术用到电力线载波通信上的解决方案，虽然载波的频带增加很多，抗干扰性好，但是仍然属于单载波数据流传输，速率并不高。

系统概述

目前，国内低压电力线配电系统的结构大都采用 TN-C-S 系统。

如图 3。

L1/L2/L3 线是相线（火线）；PEN 线是住宅外或楼宇外接地，在进入住户或楼层前分成 PE 地线和 N 中性线（零线）。

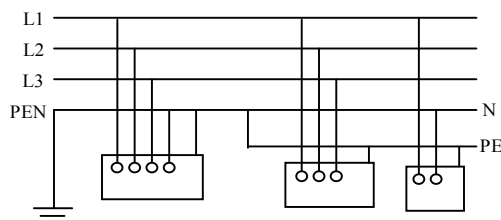


图3 TN-C-S 系统

在传统电力线载波通信系统中，耦合方式只适合低速、大幅值数据信号传输。为保证电力安全、高速传输、可靠通信，研究新型的耦合方式。

如图 4。

图中：L 相线、N 中性线（零线）、PE 地线、GZ 阻波电感、C 高压耦合电容、JL 结合器、GL 高频电缆、ZC 载波控制器。

耦合装置有如下特点：

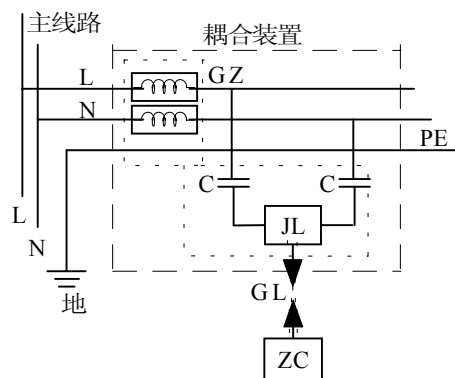


图4 电力线载波系统组成示意图

- (1) 高频信号在电力线和中性线上是差分传输，能有效抑制共模干扰。
- (2) 形成了相-中性线、相-地和中性线-地三条通道。通道衰减较单纯的相地通道的衰减小。
- (3) 若电力线断路或者短路接地，仍然有中性线-地通道可传输信号，这就提高了通道运行的可靠性和传输质量。

多载波调制、扩频调制和载波调制

从数据链路层来的数据帧，在物理层变成比特流。如图5。

正交序列单元(M)是一个映射，它将比特数据映射到一个完备正交集矩阵的子向量上，这个矩阵可以由正交函数组成，比如：阶数为 m 的 Hadamard 矩阵的行和列就是正交 Walsh 码。序列调制可以通过 FHT(Fast Hadamard Transform)或者 FFT(Fast Fourier Transform)实现。但是，FHT 比 FFT 更加容易实现，因为 FHT 只进行实数变换，并且只有 $+1$ 和 -1 两个值，而 FFT 需要复数变换。

首先，数据帧进行多载波调制。要发送的数据流，经过串/并转换器(S/P, Serial/Parallel)，它将串行输入的比特流转换成多个（比如 n 个）并行的比特流，即一个符号包含 n 个比特，这 n 个比特构成 n 阶的向量；接着，将这 n 阶的向量通过正交序列单元(M单元)映射到高阶（比如 m 阶， $m > n$ ）完备正交集的一个向量；然后，通过序列调制（比如 FHT），将多个载波相加。

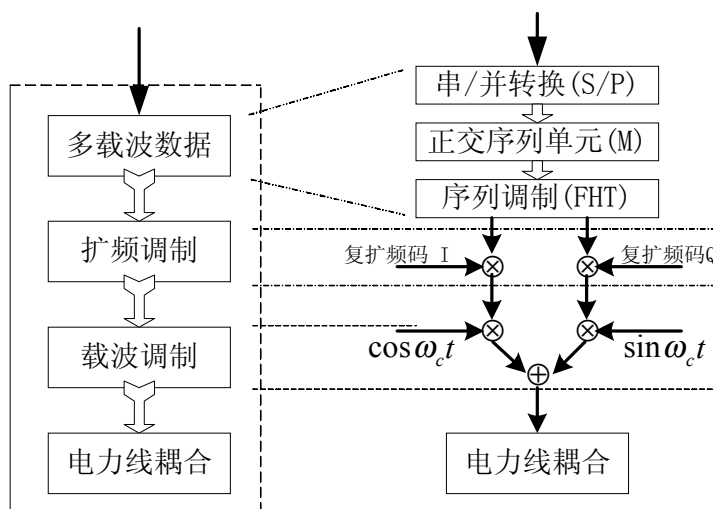


图5 物理层的多载波扩频调制

在同步的情况下，正交集矩阵中的 Walsh 函数具有理想的互相关特性。虽然电力线信道中，不存在无线通信中由于多径信道产生的多径时延，但是电力线信道干扰很大，Walsh 函数的互相关特性变得比较恶劣，将导致系统性能急剧下降。

所以，经过多载波调制的信号还应该进一步用 PN(伪随机, Pseudo Noise)扩频序列进行扩频，该 PN 序列可用来实现 CDMA (Code Division Multiple Access, 码分多址)，同时，还可用于多码 (Multi-Code) CDMA。多码 CDMA 技术属于并行 CDMA 技术。并行 CDMA 系统包括有：多载波 (MC, Multi-Carrier) CDMA 系统，多码 CDMA 系统等。多载波 CDMA 可以在衰落信道进行高数据率传输和有效地克服符号内干扰以及多径衰落，但是多载波 CDMA 系统对载波相位抖动很敏感，多码 CDMA 系统克服了这一缺陷。因为电力线信道阻抗特性会对载波相位也有影响，多码 CDMA 正好能适合这样的场合使用。

接下来的载波调制是将输入的比特流转换成在信道上能传送的信号波形。采用离散多音频 (DMT, Discrete Multi-Tone) 调制方案，比正交幅度调制 (QAM, Quadrature Amplitude Modulation) 和无载波振幅相位调制 (CAP, Carrierless Amplitude Phase Modulation) 更适合高速率数据传输。多音频调制 (DMT) 是 ADSL (非对称数字用户线路, Asymmetric Digital Subscriber Line) 的 DMT 版本和 VDSL (超高速数字用户线路, Very High Speed Digital Subscriber Line) 的一些多载波版本的基础。DMT 建立在 QAM 的一些思想上，假设存在多个星座图编码器。每个编码器接收一系列数据比特流。编码器的输出值仍然是正弦波和余弦波幅度；然而每个星座图编码器将使用不同的正弦波和余弦频率。所有的正弦波和余弦波于是被加在一起并通过信道发送出去。这个波形就是一个简单的 DMT 码元。如图 6。

在接收机端分离不同频率上的正弦波和余弦波，那么每个波形序列都可以被独立地解码，由解码器输出比特流。在无线通信中，虽然也是使用不同的频率来传送不同的信息，但是 DMT 的不同之处在于 DMT 的“接收机”可以一次性接收所有信道的信号数据，而其他的系统一般只能一次接收一个信道的信号数据。由于在上面的扩频调制中，采用了正交扩频码多码 CDMA 调制，使得各个载波已经具备了很好的正交性。所以这里没有强调要求 DMT 的每个编码器使用的正弦波和余弦波频率是某个公共频率的整数倍，以及码元周期是公共频率的倒数（也可以是公共频率倒数的整数倍）。

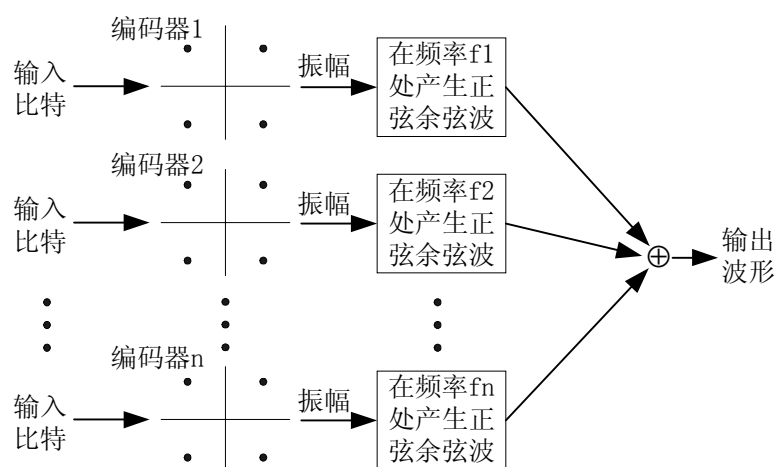


图 6 多音频调制器结构图

载波信号的频谱相关检测方法

因为电力线载波信号由低功率谱密度的扩频信号生成，而且电力线上的衰减和干扰很大，所以，在这样的噪声环境中很难直接检测和提取载波信号。传统的无线通信中基于能量检测的典型系统由带通滤波、乘法器（无本地参考信号时为平方器）、积分器和门限判别组成。在检测系统的输出中会有一些不可抑制的和去除的噪声和干扰成分。在低信噪比和高斯白噪声的情况下，只有采用多次累积的方法，噪声功率谱趋于平坦，因此，扩频信号的功率谱的形状才会显露出来，检测出载波信号的存在，并估计其信号参数。但当有干扰比较复杂时，采用多次累积后，干扰信号的功率谱不一定会趋于平坦，尤其是当干扰信号在不断变化的时候就很难观察出扩频信号的功率谱的形状，更不用说检测。

采用频谱相关检测，直接计算接收的载波信号的频谱相关密度；或者是在与本地参考信号相乘后，计算频谱相关密度，可获得在极低的信噪比条件下的信号检测能力。

介质控制和多用户访问方式

采用 Predictive P-Persistent CSMA（预测 P 的持续载波侦听多路访问）介质控制方式。

4. 硬件描述

特性：

以 MC56F805 (DSP)为核心控制器

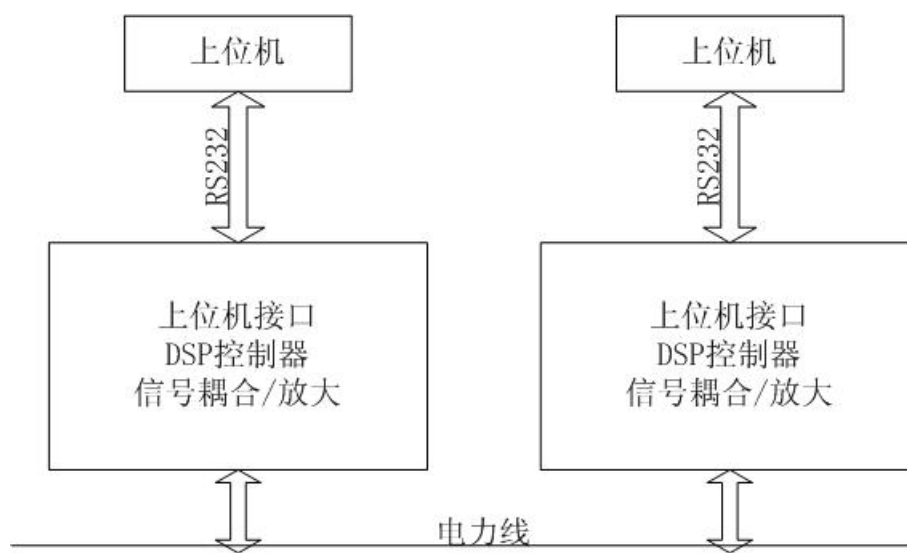
采用电力线高速通信耦合技术

把有线通信的多载波技术和无线通信的扩频技术结合

用 DSP 内置 12bit ADC，使用其中 2 路差分采样耦合器输出端的电压

用 DSP 内置 15bit PWM，输出载波信号（目前还达不到高速）

运用计算机模拟测试



上位机接口电路

执行应用程序

6) 调整软定时器

主流程图

