

文章编号:1000-582X(2010)02-0047-04

# 电力线载波通信的远程控制系统

仲元昌,刘勇,李飞,李秀珍

(重庆大学通信工程学院,重庆 400044)

**摘要:**针对电力设备远程测控系统的可靠性和经济性问题,提出了一种利用电力线载波通信的远程测控应用方案,采用电力网作为控制信息传输信道,优选了适应低压电力网信道特性的 MSK(minimum shift keying)调制/解调技术,分析了 MSK 调制/解调技术原理,并利用 MSK 技术和可编程逻辑控制器(programmable logic control PLC)智能控制单元,构建了利用电力网通信的电力设备远程测控系统模型,研制了利用电力线载波通信的电力设备远程测控系统。实验结果表明:MSK 调制技术较好地满足了电力网通信信道特性,实现了测控信号的可靠传输,提高了电力设备远程测控的可靠性,降低了系统成本。

**关键词:**电力设备;远程控制;最小频移键控;低压电力线通信

**中图分类号:**TM726 ; TM771

**文献标志码:**A

## Remote control system based on low voltage power line communication

ZHONG Yuan-chang, LIU Yong, LI Fei, LI Xiu-Zhen

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In view of the reliability and the efficiency of the remote control systems for Electric Power Equipment, a remote control system is proposed in which the control information interacts by low voltage power network communication. Low voltage power network is used as the channel for control information of Electric Power Equipment. The MSK modulation and demodulation technology that is seasoned with the channel characteristics of low voltage power network were selected, while the theory of MSK is analyzed, and the remote control system model to Electric Power Equipment based on low voltage power network communication with MSK and Programmable Logic Controller is constructed. The remote control system for Electric Power Equipment is manufactured based on the model. Theoretical analysis and experimental results show that MSK can satisfy the channel characteristics of low voltage power network, realize reliable transmission of the remote control signals, and improve the reliability of the remote control system while decrease the cost.

**Key words:** electric power equipment; remote control; MSK; low voltage power line communication

在通信系统中,根据信道媒质的不同,分为有线通信系统和无线通信系统。前者采用专门的线路(例如电话线、闭路线等)来传输信息,因而布线复

杂,耗资大,成本高;后者以无线的方式传输信息,成本低,但存在阴影衰落、多径干扰及其它电磁干扰,系统的可靠性和安全性受限。考虑电力网这个幅员

收稿日期:2009-6-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50875272)。

作者简介:仲元昌(1968-),男,重庆大学博士,副教授,主要从事通信与测控技术方向研究,(Tel)13072301864;(E-mail) zyc@cqu.edu.cn。

广阔的现成布线资源,充分发掘其潜能。利用电力线传输遥控信号,以实现电力线载波遥控,具有重要研究意义。在电力系统远程监控及调度系统的通信方式中,利用输电线的载波通信已存在几十年,技术也相当成熟;对于低压(380V/220V)系统,近十年来,编码正交频分复用系统(coded orthogonal frequency division multiplexing, COFDM),及装置有许多应用<sup>[1]</sup>。

已有的研究表明:低压电力线的信道特性变化剧烈、有效带宽较窄等严重缺陷,影响了电力线通信的可靠性<sup>[2-6]</sup>。这在很大程度上制约了电力线通信的推广应用。为此,探索一种适合电力线信道特征的调制方式是解决问题的关键途径之一。当信道中存在非线性问题和带宽限制时,幅度变化的数字信号通过信道会使已滤除的带外频率分量恢复,发生频谱扩展现象,这是频率资源所不希望的。对已调信号有 2 点要求,一是要求包络恒定;二是具有最小功率谱占用率。现代数字调制技术的发展方向是最小功率谱占有率的恒包络数字调制技术。现代数字调制技术的关键在于相位变化的连续性,从而减少频率占用<sup>[5-8]</sup>。近年来新发展起来的技术主要分两大类:一是连续相位调制技术(CPFASK),在码元转换期间无相位突变,如 MSK, GMSK 等;二是相关相移键控技术(COR-PSK),利用部分响应技术,对传输数据先进行相位编码,再进行调相(或调频)。MSK(最小频移键控)是移频键控 FSK 的一种改进形式。在 FSK 方式中,每一码元的频率不变或者跳变一个固定值,而两个相邻的频率跳变码元信号,其相位通常是不连续的。MSK 就是 FSK 信号的相位始终保持连续变化的一种特殊方式,可以看成是调制指数为 0.5 的一种 CPFASK 信号<sup>[7-10]</sup>。

在此基础上提出:利用 MSK 技术对数控信号(数字信号)进行调制,以适应低压电力线恶劣的信道特性,经电力线传输,从而实现对电力线上远端的电力设备进行遥控。

## 1 系统模型

把数控信号通过 MSK 调制后,耦合至低压电力线,经电力线传输至受控终端,以实现对终端电力设备的遥控。其系统模型如图 1 所示。图 1 中,控制信源发出数控信号,经 MSK 发射机调制发射,通过专用电力线耦合器进入电力线信道;再由专用电力线耦合器耦合到 MSK 解调接收机还原出数控信号<sup>[7-10]</sup>,该数控信号就是相应的 PLC 程控指令,最终通过 PLC 对相应的电力设备实施控制作用。

### 1.1 MSK 发射机模型

MSK 发射机是本系统的关键环节,也是关键技

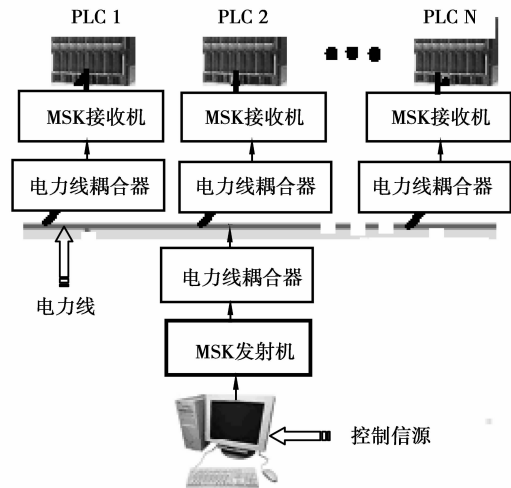


图 1 电力线远程控制系统

术。MSK 是 2FSK 的一种特殊情况,它具有正交信号的最小频差,在相邻符号交界处相位保持连续。在一个码元时间  $T_b$  内,这类连续相位 FSK (CPFASK)可表示为<sup>[11-13]</sup>

$$S_{\text{CPFASK}}(t) = A \cos[\omega_c t + \theta(t)]. \quad (1)$$

当  $\theta(t)$  为时间的连续函数时,已调波相位在所有时间上是连续的。若传 0 码时载频为  $\omega_1$ ,传 1 码时载频为  $\omega_2$ ,它们相对于未调载波  $\omega_c$  的偏移为  $\Delta\omega$ ,式(1)可写为

$$S_{\text{CPFASK}}(t) = A \cos[\omega_c t + \theta(0)], \quad (2)$$

其中:  $\omega_c = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$ ,  $\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2}$ 。

比较式(1)和式(2)可以看出,在一个码元时间内,相角  $\theta(t) = \pm \Delta\omega t + \theta(0)$ ,其中,  $\theta(0)$  为初相角,取决于过去码元调制的结果,它的选择要防止相位的任何不连续性。

对于 FSK 信号,当  $2\Delta\omega T_b = n\pi$  ( $n$  为整数)时,就认为它是正交的。为了提高频带利用率,  $\Delta\omega$  要小,当  $n=1$  时,  $\Delta\omega$  达最小值,有  $\Delta\omega T_b = \pi/2$ ,或  $2\Delta f T_b = 1/2 = \beta_f$ ,可得频偏为  $\Delta f = 1/4 T_b$ ,频差为  $2\Delta f = 1/2 T_b$ ,它等于码元速率  $1/T_b$  之半,这是正交信号的最小频差。CPFASK 的这种特殊选择即为最小频移键控(MSK)。若扩展到多个码元时间上,其时间参数为  $a_k$ ,初相角为  $\theta_k$ ,则有

$$\theta(t) = \frac{\pi t}{2T_b} a_k + \theta_k, \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)便得到 MSK 的表达式

$$S_{\text{MSK}}(t) = A \cos(\omega_c t + \frac{\pi t}{2T_b} a_k + \theta_k). \quad (4)$$

因  $\sin \theta_k = 0$ ,其三角展式为

$$S_{\text{MSK}}(t) = A[a_1(t) \cos(\frac{\pi t}{2T_b}) \cos \omega_c t - a_Q(t) \sin(\frac{\pi t}{2T_b}) \sin \omega_c t] =$$

$$A[I(t)\cos\omega_c t - Q(t)\sin\omega_c t] \quad (5)$$

式(5)中

$$I(t) = a_I(t)\cos(\frac{\pi t}{2T_b}); Q(t) = a_Q(t)\sin(\frac{\pi t}{2T_b});$$

$$a_I(t) = \cos\theta_k; a_Q(t) = a_k \cos\theta_k.$$

由式(5)知:MSK 信号可采取正交调制的方法产生,由此构建的发射机模型如图 2 所示。

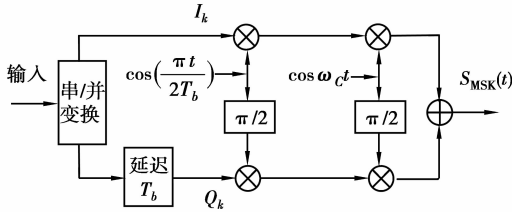


图 2 MSK 发射机模型

当两支路码元互相偏离  $T_b$  时,恰好使  $\cos(\frac{\pi t}{2T_b})$  和  $\sin(\frac{\pi t}{2T_b})$  错开 1/4 周期,保证了 MSK 信号相位的连续性。其工作原理为:先将输入的基带信号进行差分编码,然后将其分成  $I$ 、 $Q$  两路,并互相交错一个码元宽度,再用加权函数  $\cos(\frac{\pi t}{2T_b})$  和  $\sin(\frac{\pi t}{2T_b})$  分别对  $I$ 、 $Q$  两路数据加权,最后将两路数据分别用正交载波调制。

### 1.2 接收机模型

设两正交基信号为  $\phi_1(t)$  和  $\phi_2(t)$ ,  $n(t)$  为电力线上的加性噪声。则接收电路输入信号为<sup>[14]</sup>

$$R(t) = S_{MSK} + n(t). \quad (6)$$

由此构建 MSK 解调接收机模型如图 3 所示。

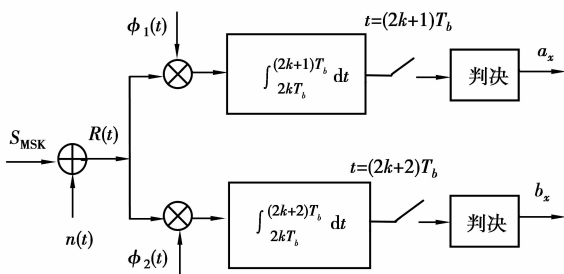


图 3 MSK 信号接收机模型

接收信号与正交基信号  $\phi_1(t)$  和  $\phi_2(t)$  相关,同相支路和正交支路的积分时间均为  $2T_b$ ,需注意的是,正交支路的积分和判决均滞后同相支路  $T_b$ 。2 个支路相关的积分结果为

$$r_I = \int R(t)\phi_1(t)dt = S_I + N_I, \quad (7)$$

$$r_Q = \int R(t)\phi_2(t)dt = S_Q + N_Q, \quad (8)$$

其中:  $N_I$  和  $N_Q$  为噪声相关积分值,且  $S_I = \sqrt{E_b} \cos\phi(0)$ ,  $S_Q = -\sqrt{E_b} \sin\phi(0)$ ;判决规则为当  $r_I$  大于 0,则  $\phi(0)$  为 0;当  $r_I$  小于 0,则  $\phi(0)$  为  $\pi$ ;当

$r_Q$  大于 0,则  $\phi(T_b)$  为  $-\pi/2$ ;当  $r_Q$  小于 0,则  $\phi(T_b)$  为  $\pi/2$ 。

## 2 系统实现

以为某火电厂研制的“燃煤传送链的电力线远程控制系统”为例,简述其具体应用及实现过程。系统的控制对象为燃煤传送链,控制距离不小于 2 km,控制信号传输信道为低压电力线,调制方式采用 MSK,控制单元选用 PLC。

### 2.1 PLC 的硬件配置

考虑工程实际需要,在控制方式选择上需要 3 个启动按钮,分别完成自动方式、单动方式和手动方式的启动,还需要 1 个停止按钮用来处理在任何情况下的停止运行。运动的限位开关有 4 个:高位限位开关、低位限位开关、左位限位开关和右位限位开关。共有 14 个数字量输入信号。输出信号有下降驱动信号、上升驱动信号、右移驱动信号、左移驱动信号,共有 5 个数字量输出信号。选择 S7-300 系列的 CPU313,加上数字量输入模块 SM321 及输出模块 SM322 就可以满足要求,而且还有一定的裕量。

### 2.2 PLC 的软件设计

主程序梯形图如图 4 所示<sup>[15]</sup>。

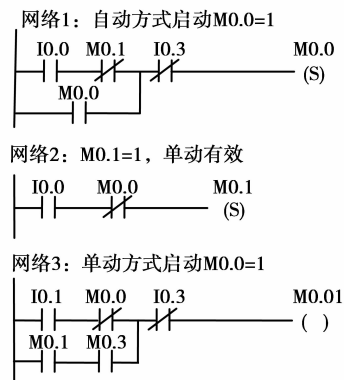


图 4 主程序梯形图

这里只给出组织块(主程序)设计,组织块 OB1 用于设定机械手启动方式,主要负责功能块或子程序的调用,以及系统的循环扫描、故障诊断和输出刷新。

## 3 实验结果与分析

该系统参数为:载波频率  $f_c = 320$  kHz,包络频率  $f_d = 80$  kHz,传号频率  $f_m = 400$  kHz,空号频率  $f_s = 240$  kHz,数据速率  $f_i = 2.52$  kHz。实验测得的 MSK 调制(解调信号波形如图 5 所示。从图 5 的波形可见,正弦波的疏密程度不同,这正是利用正弦载波的频率变化来表示调制信息的结果。MSK 解调信号的峰值达到 5 V,而且未见明显的干扰信号。测试结果表明该电力线远程控制系统误码率低、抗干扰能力强。

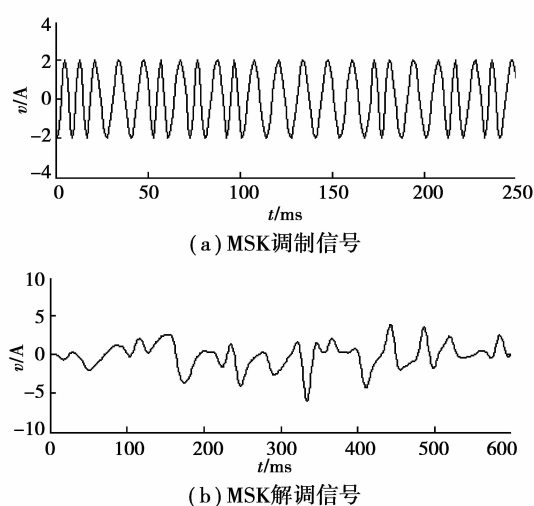


图5 MSK调制解调信号

## 4 结 论

用MSK调制/技术,对数控信号进行调制,以适应电力线的信道特性,由此构建的利用电力线通信的远程控制系统,有较好的频率利用率,提高了系统的抗干扰能力、降低了误码率。该系统应用在某火电厂的燃煤传送链远程控制中,取得很好的应用效果。其突出优点是:成本低、安装方便、可靠性高。因此,该系统可广泛应用于对电力线上电力设备的开关控制。

### 参考文献:

- [1] DE CAMPOS, FABR ICIO P V; DUQUE C A, CERQUEIRA A S, et al. Clustered-COFDM for broadband PLC systems [C]//2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. [s.l.]:[s.n], 2007:216-221.
- [2] QI J J, HUANG N, LI Y. Experiment and analysis of transmission line parameter for carrier wave communication over low-voltage power line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2008,28(4):41-44.
- [3] PAPADOPOULOS T A, GRIGORIS K, DOKOPOULOS P S. Low-voltage distribution line performance evaluation for PLC signal transmission [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1903-1910.
- [4] FENG P, WU G C, LI G. Study of a new time transfer method of low voltage power line [J]. IEEE Xplore, 2007:823-826.
- [5] WANG Z C, HOU H, A GAN Y. Feature extraction of the Noise in L-PLC[J]. International Conference on Automation and Logistics, 2007, 8:18-21.
- [6] XIAO H, NON-MEMBER, ZENG X J. Medium-voltage power line carrier communication System, 2004 International [C]//Conference on Power System Technology - POWERCON 2004. [s.l.]:[s.n] 2004 (11):1536-1539.
- [7] CHRISTIAN H. Data transmission applications via low voltage power lines using OFDM technique[J]. IEEE Xplore,1996,210-214.
- [8] YANG Y, HU Z J, ZHANG C X. Realization of high speed digital carrier communication module using [J]. COFDM, 2004,4:592-596.
- [9] 仲元昌,曾孝平. 低压电力线扩谱通信系统及抗干扰性能分析[J]. 电工技术学报, 2004,19(9):82-85. ZHONG YUAN-CHANG, ZENG XIAO-PING. Spread spectrum communication system on low voltage power line and its analysis of anti-Jamming capability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(9):82-85.
- [10] HUI XIAO, WU XUE BIN, TONG XIAO-JIAO. Application of spread spectrum communication in medium voltage power line carrier [C]. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition,2005:1-4.
- [11] KRISHNA R. Design of serial concatenated MSK schemes based on density evolution [J]. IEEE Transactions on Communications, 2003,8:1283-1295.
- [12] PASCAL C, FRANÇOIS P. New insights into optimal widely linear array receivers for the demodulation of BPSK, MSK, and GMSK signals corrupted by noncircular interferences—application to SAIC [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006,54(3): 870-882.
- [13] 仲元昌. 基于MSK的低压电力线通信[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2003,26(1):42-44. ZHONG YUAN-CHANG. Low voltage power line communication based on MSK [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science edition, 2003, 26(1):42-44.
- [14] ANATORY J, THEETHAYI N, THOTTAPPILLIL R M. A broadband power-line communication system design scheme for typical tanzanian low-voltage network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1218-1224.
- [15] 谭春禄,丁漩,仲元昌. 现代物流机械手智能测控系统设计[J]. 重庆大学学报:自然版, 2008,31:53-55. TAN CHUN-LU, DING XUAN, ZHONG YUAN-CHANG. Design of intelligent control system for manipulator in modern logistics [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2008,31:79-80.

(编辑 侯 湘)