

差分码移键控在低压电力线抄表中的应用

王睿, 杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 随着自动抄表技术和低压电力线通信技术的日益发展, 利用低压电力线作为媒介的抄表方式得到了广泛关注。但由于我国低压配电网强干扰的特性, 此方式的应用效果很不理想。分析了低压电力线信道特性, 研究了抗干扰力强的差分码移键控(DCSK)的调制解调原理, 提出了基于低压电力线抄表系统的DCSK通信方案。文章建立了电力线信道模型, 对抄表系统常用通信手段进行了对比仿真, 证明了该方案的可行性, 并在现场测试成功, 在保证传输可靠有效的情况下, 提高了传输速率, 降低了信道信噪比和解扩时严格同步的要求, 抄表效果良好。

关键词: 自动抄表; DCSK; chirp信号; 信道特性

Differential code shift keying for meter reading system based on low-voltage power line

WANG Rui, YANG Ren-gang

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of meter reading technology and low-voltage power line telecommunication, reading meters based on low-voltage power line have been widespread concerned. However, due to the interference for Chinese low-voltage distribution network, application of this approach is far from ideal. After analyzing the properties of the low-voltage power line channel and discussing the modulation principle of differential code shift keying (DCSK), this paper proposes a DCSK communication scheme for meter reading system based on low-voltage power line. Normal communication schemes for meter reading are simulated and contrasted. DCSK proved feasible and has been successfully applied in the project. Guaranteed the transmission reliability, the scheme improves transmission speed, reduces the requirements of SNR and strict synchronization for demodulation.

Key words: automatic reading meter; differential code shift keying; chirp signal; channel property

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0026-05

0 引言

自动抄表系统, 简称AMRS (Automatic Meter Reading System), 是指采用通讯和计算机网络等技术, 通过专用设备对电表自动读取、处理表计数据, 最终实现远程抄读用户消耗能量的智能化管理系统。它作为配电网自动化系统中的重要组成部分, 从根本上克服了传统的人工抄表模式弊端, 为整个系统提供具体、准确的用电现场数据, 有利于供电企业合理配送电量, 提高管理水平和经济效益。

据资料统计, 已入网试运行的自动抄表系统中84%采用低压电力线(220 V, AC)载波通信^[1]。如此大范围地使用电力线作为通信媒介, 是由于电力线独有的优势: 覆盖面广、永久在线, 不需要额外投资修建通信专线及运行维护。

但由于低压电器电磁兼容性与低压电网的电磁

污染, 使得在低压电力线上传输高频信号非常困难。因此, 必须采取有效技术克服以上困难, 实现电力线可靠、高效数据通信。目前, 国内外常用的是对数据信号进行调制、扩频处理来抵抗干扰, 如FSK、SS、OFDM。其中, FSK、DSSS应用于抄表系统已初具规模, 在国外反映良好。但由于我国电网电磁干扰严重, 应用效果很不理想, 常会出现不抄或抄错的现象。归其原因, 还是由于这些调制技术自身性能不足以满足我国电网要求: FSK模块抗噪声能力较差, 难以实现远距离传输; SS、OFDM模块要求的同步性很高, 对同步误差相当敏感, 对于多径时延较重的低压电力线而言, 通信复杂且困难。

本文针对国内电网环境的实际情况, 采用了性能优良的DCSK (differential code shift keying) 调制技术。本质上讲, 它属于CSK扩频技术, 具有比FSK、DSSS更强的抗干扰能力, 而且降低了系统对

同步的严格要求, 因而比 OFDM 更利于工程实现。基于 DCSK 技术, 文章设计了低压电力线自动抄表系统通信方案, 实现了电表数据在电力线上可靠传输。

1 低压电力线信道分析

低压电力线信道不同于光纤、同轴电缆、双绞线等专用通信信道, 它主要有两方面特点: ①存在各类干扰。电力网中大量的用电设备可能同时释放干扰, 这些干扰频谱宽、时变性大, 使通信过程中信噪比很低, 数据传输误码率提高。② 低压配电网的物理拓扑和网内负载有一定的“时变性”, 这种变化会导致通信信道变化甚至使通信链路发生中断, 降低电力线通信可靠性。

1.1 低压电力线信道建模

图 1 给出了基于多径模型的低压电力线信道模型框图, 除噪声外所有的损耗都用频率响应时变线性滤波器 $H(f, t)$ 来表征, 噪声为电力线信道中各类噪声干扰的叠加。

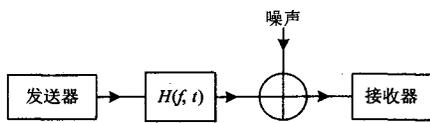


图 1 低压电力线信道模型

Fig.1 Low-voltage power line channel model

本质上讲, 低压电力线与其它电磁传输线类似, 也是电磁波传输线, 与传输线匹配的频率响应 $H(f, t)$ 可以由传播常数 γ 来表达, 沿电力线与电压源距离为 l 处的电压满足公式(1)与公式(2)。

$$V(l, t) = H(f, t)V(0, t) \quad (1)$$

$$H(f, t) = e^{-\gamma(f, t)l} = e^{-\alpha(f, t)l} e^{-j\beta(f, t)l} \quad (2)$$

其中: $V(0)$ 为电压源处电压, α 是传播常数的实部, 称为衰减常数, β 是传播常数的虚部, 称为相位常数。得到传播常数后, 就可以得出传输线上相应点处的传输函数^[2]。

另外, 由于低压电力线本身存在一定的阻抗, 所以发送信号在电力线上进行传输时会受到高频衰减, 影响无失真接收效率。综合而言, 信号在通信系统中的衰减主要分为耦合衰减与线路衰减两部分。

当负载阻抗很小时, 发送耦合电路的内阻不可忽视, 它会分去发送信号相当一部分功率。所以在实际应用中, 将耦合器的内阻做的尽可能小。

降低高频衰减, 除了提高发送功率和耦合效率的策略外, 最为常用的就是采用中继技术, 通过线路接力的方式, 分级扩大信号功率, 增大线路传输的信噪比。

1.2 低压电力线信道噪声

根据文献[3], 低压电力线中的加性噪声可分为 5 类: 窄带噪声、彩色背景噪声、同步周期冲激噪声、异步周期冲激噪声和突发冲激噪声。

在电力线上传输数据时, 突发冲激噪声影响最大, 它的幅度和功率谱密度都远远超过了其它的噪声, 会导致大数据包的丢失。

图 2、图 3 分别为上、下班时间某办公楼内总开关处某相噪声分布。由图可知, 上班时噪声达到 -15 dB, 下班后用电设备大幅度减少, 噪声基本降到 -45 dB, 信道环境明显好转。对于抄表这种实时性要求不高的工程, 可以选择在夜间完成。



图 2 上班时噪声

Fig.2 Noise at office hours



图 3 下班后噪声

Fig.3 Noise at rest hours

2 DCSK 技术

差分码移键控 DCSK (Differential Code Shift Keying) 是一种特殊的扩频通信。它以扩频码循环移位的形式, 利用移位前后的波形之间时间偏移量代替要发送的原始信息, 实现数据传输^[4]。

系统所用的扩频码为 chirp 信号, 它具有良好的自相关特性, 满足匹配滤波解调要求。

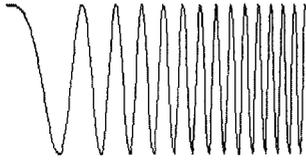


图4 chirp 波形
Fig.4 Chirp waveform

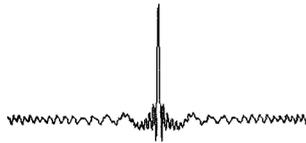


图5 相关性
Fig.5 Correlation performance

2.1 调制

DCSK 通信系统发送端框图如图 6 所示。

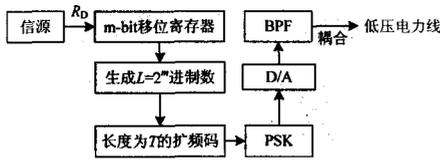


图6 DCSK 发端图
Fig.6 Source of DCSK system

设二进制信息比特率为 $R_D=1/T_D$, T_D 为信息码元宽度。信息信号流如式(3), 式中 a_n 为信息码元:

$$a(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n g_D(t - nT_D) \quad (3)$$

$$g_D(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_D \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (4)$$

现将信号码经串并变换后, 按 m 位分组, 第 i 组为:

$$a_i(t) = \sum_{l=im}^{(i+1)m-1} a_l g_D(t - lT_D) \quad (5)$$

则信息信号流式改写为:

$$a(t) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i(t) \quad (6)$$

此时, 信息符号速率为 $R_S = mR_D$, 每组时间长度为 $T_S = mT_D = NT_C = PN$ 码周期, N 为 PN 码长, T_C 为 PN 码 chip 宽度。

与第 i 组 m 位信息码对应的扩频码标号为 j_i ,

扩频码为 $PN^{(j_i)}$, $M=2^m-1$:

$$j_i = \sum_{l=im}^{(i+1)m-1} a_l 2^l, \quad j_i = 0, 1, \dots, (2^m - 1) \quad (7)$$

表 1 给出了分组的数据信息码片与扩频码移位的对应关系。

表 1 扩频码与数据比特的对应关系

j_i	信息码片 (m 位)	扩频码序列	符号
0	000...000	C(0)C(1)C(2)...C(N-1)	$PN^{(0)}$
1	000...001	C(1)C(2)...C(N-1)C(0)	$PN^{(1)}$
...
M	111...111	C(M-1)...C(N-1)C(0)C(1)...C(M-2)	$PN^{(M)}$

综上可得, 发送端信息流为:

$$s(t) = \left\{ \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{N-1} PN[\text{mod}(l + j_i)] \cdot p[t - lT_C - iT_S] \right\} \cdot \cos \omega_c t \quad (8)$$

其中: ω_c 为发射载波角频率, mod 为取模 N 运算,

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_C \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (9)$$

经过低压电力线信道传输后, 接收信号由未经衰落的发送信号 $s(t)$ 及信道噪声 $n(t)$ 叠加而成:

$$r(t) = \sqrt{\frac{E_S}{T_S}} s(t) + n(t) \quad (10)$$

其中: E_S 为信号能量。

2.2 解调

DCSK 通信系统接收端框图如图 7 所示。

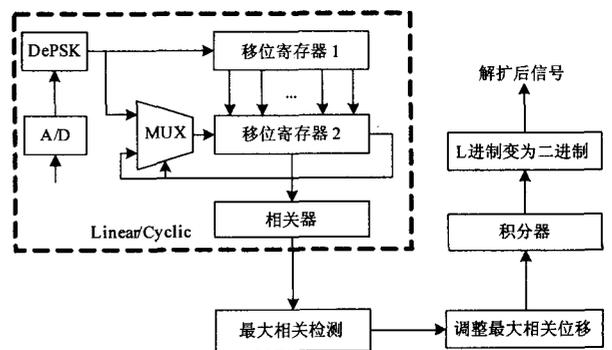


图7 DCSK 系统收端图

Fig.7 Sink of DCSK system

假设接收机已经与接收信号建立了扩频码的定时同步, 则经相关器中的匹配滤波、最大相关检测后, 在第 k 个符号周期, 匹配滤波输出为:

$$y(k, v, t) = \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} r(t)PN_{k-1}^{(v)}(t)\cos\omega_c t dt = \sqrt{\frac{E_S}{T_s}} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} s(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t)\cos\omega_c t dt + \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} n(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t)\cos\omega_c t dt \quad (11)$$

其中: v 表示匹配滤波器中扩频码模板 PN_{k-1} 的循环移位数, 由于扩频码长为 N , 所以 v 可取 $0 \sim N-1$, 所以在一个码片时间, 匹配滤波器有 N 个输出 y 。

这里要强调的是, 当前时刻的接收端信号是与前一时刻经过解调处理后的 PN 信号进行匹配相关处理, 而不是最初时刻的 PN 信号(参考序列)。其处理后的实质就是将当前时刻信号的标记值与前一时刻标记值差分, 也就是 DCSK 中 D(差分)的方式。经过差分解调, 不仅减小定时偏差, 而且也不需要时刻知道信号参考值, 可以有效降低解调对同步的要求。

公式(11)中等式后的第一项为信号分量:

$$\begin{aligned} & \sqrt{\frac{E_S}{T_s}} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} s(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t)\cos\omega_c t dt = \\ & \sqrt{\frac{E_S}{T_s}} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} PN_k(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t)\cos^2\omega_c t dt = \\ & \sqrt{\frac{E_S}{4T_s}} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} PN_k(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t) dt \end{aligned} \quad (12)$$

由于扩频码 PN 具有很好的自相关性, 有:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{E_S}{4T_s}} \int_{kT_s}^{(k+1)T_s} PN_k(t) \cdot PN_{k-1}^{(v)}(t) dt = \sqrt{\frac{E_S}{4T_s}} NT_C, & j_k = j_{k-1} + v \\ 0, & j_k \neq j_{k-1} + v \end{cases} \quad (13)$$

即匹配滤波器 N 个输出中有信号输出的条件是: $v=j_k-j_{k-1}$ 。所以通过最大相关检验, 得出有强信号产生的对应 v_{\max} 值。已知最初符号标记值与各符号之间的差值, 也就得出解调后每一符号的标记值。依次将标记值转换成 m 位二进制数, 就得到了解调出的原始信息比特序列。

式中第二项(噪声分量), 相当于对信道中加入的噪声进行扩频处理。即噪声的能量被分散到更广阔的频率范围内, 量值会减小。当信噪比较大时, 分散后的噪声能理相对于信号分量几乎可以忽略。但当信道条件很恶劣时, 处理后的噪声仍能阻碍信号解调的正确输出, 产生误码。

根据文献[5], 仅考虑高斯白噪声时, 数据码错

误率为

$$P_{e, \text{data}} = \frac{m}{2} \times [1 - (1 - \frac{1}{2} \exp(-\frac{\sqrt{\frac{E_S}{T_s}} NT_C})^4)^{(N-1)}] \quad (14)$$

由于 DCSK 本质上是扩频技术的一种, 扩频对同步的要求: 精度高, 建立时间快, 同步保持时间长和失步概率小。经差分处理后, 大大降低了同步的要求。但当信噪比很小且时延较大时, 解调端仍需加入同步捕获和跟踪环节。

3 低压电力线自动抄表系统

低压电力线自动抄表系统通过低压电力线等线路实现计量仪表数据的集中采集、存储、传输和处理。图 8 为系统抄收电表数据模型。

其中, 数据传输主要分为两部分。第一部分是: 利用低压电力线实现数据从用户仪表端传送到配电变压器侧的集中器; 第二部分是: 采用无线或专用线路完成数据从配电侧到远方的数据管理的传送。本人的工作是实现抄表系统前一部分的功能。

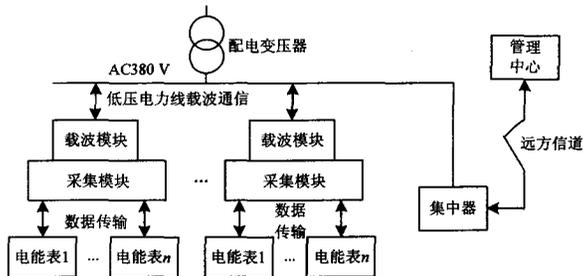


图 8 低压电力线抄表系统结构

Fig.8 Structure of AMRS based on low-voltage power line

3.1 计算仿真

3.1.1 误码性能

模拟低压电力线信道, 对直序扩频(DSSS)、码移键控(CSK)、差分码移键控(DCSK)四种调制方式的数据传输性能进行仿真对比。

表 2 仿真参数设置

Tab.2 Parameter setting

扩频码类型	chirp 信号	扩频码码长	1 024 bit
信号长度	1 000 bit	信号分片单位	5 bit
传输频段	95~125 kHz	信噪比	1~30 dB
脉冲干扰幅值	10	脉冲干扰频率	100 kHz
高斯白噪声能量	1	定时偏差	100 bit

图 9 假设接收端相关器产生的本地扩频码与接收信号严格同步。从图中可以清楚地发现: 要达到理想的误码率(10^{-6} 以下), 直扩方式所需的信噪比最大, 即抗噪能力最差; CSK 传输性能略优于

DCSK。但 CSK 解扩时存在相位模糊问题，使接收端在某些时刻无法得到正确的传送信息^[13]。本图选用的是 CSK 调制的最佳情况。图中 DCSK 劣于 CSK，是由于前者在解扩时存在积分处理。积分会造成偏移量误差的累积，使误码率升高。但从图中可以看到当信噪比大于 10 dB 时，DCSK 已能实现零误码率。

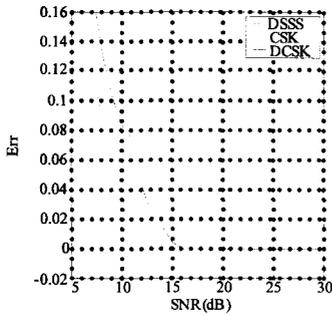


图9 严格同步时的误码率
Fig.9 Error ignoring sync

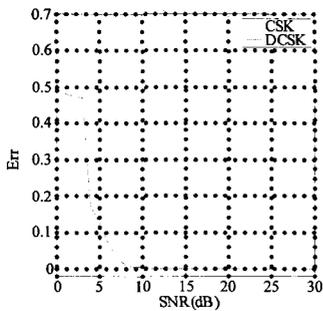


图10 存在定时偏差时误码率
Fig.10 Error considering sync

由于信道的时变性，在传输中可能存在频率偏移；同时发送端与接收端之间的采样时钟也极有可能出现偏差，引入相位噪声，所以系统严格意义上的同步难以达到。图 10 就是在考虑存在定时偏差时的实验结果。DCSK 的误码性能之所以优于 CSK，是因为 DCSK 具有差分检测：接收时某一时刻的相关运算只与上一时刻有关，与开始时刻没有直接关系，这样就减弱了共同相位误差的影响，减小了相位噪声对系统的损害，降低了系统对同步的要求。

3.1.2 传输速率

DCSK 方式对应信息的一个码片发送一个可做 0~M 位移的扩频序列。因此，信息传输速率为

$$R = \log_2(M+1)/T_s = m/T_s \quad (15)$$

DCSK 速率与 CSK 速率相同，是 DSSS 速率的 m 倍。

综上不难看出，在低压电力线这个环境较恶劣的信道中通信，DCSK 相比其它几种调制方式有明显的优越性，值得在工程上应用。

3.2 工程应用

依据图 8 所示的系统模型，在本校科研楼（共七层）进行了电表集抄实验。在每一层安装一个电能表，并将各表与一个以 DCSK 为调制技术的载波模块相连。电表数据通过楼内低压电力线发送到位于六层的集中器模块进行分析处理。经过多次测试得出：抄表系统在夜间可以成功抄收到各表数据，在白天工作时段也能基本实现完全抄收。而利用 FSK、DSSS 技术的抄表系统，无论白天或夜间都只能抄收个别楼层的电表数据。

4 结束语

本文提出了低压电力线自动抄表系统的 DCSK 通信方案。通过对 DCSK 原理及性能的研究分析，证明了该方案的可行性和优越性，最后在工程上实现了电表数据的远距离成功抄取。

参考文献

- [1] 郭恩磊，徐建政. 远程自动抄表系统中的现代通信技术[J]. 电力系统通信, 2007, 28 (181): 18-21.
GUO En-lei, XU Jian-zheng. Modern Communication Technology in Remote Automatic Meter Reading System[J]. Power Telecommunication, 2007, 28(181): 18-21.
- [2] 赵云峰, 汪晓岩, 等. 低压电力线噪声分析与建模[J]. 电力系统通信, 2003,(1):31-34.
ZHAO Yun-feng, WANG Xiao-yan, et al. Noise Analysis and Modeling of Low-voltage Power Line[J]. Power Telecommunication, 2003,(1):31-34.
- [3] Soo-Young. A Channel Model for Power Line Communication in Home Network[A]. in: Proceedings on the 15th CISL Winter Workshop[C]. 2002.
- [4] Spread Spectrum Communication System Utilizing Differential Code Shift Keying[P]. United States Patent(6064695).
- [5] 杨力生, 杨士中, 等. 码移键控系统的性能分析[J]. 电视技术, 2004,(5): 66-68.
YANG Li-sheng, YANG Shi-zhong, et al. Performance Analysis of a Code Shift Keying System[J]. TV Technology, 2004,(5): 66-68.

收稿日期：2008-10-23 修回日期：2009-07-19

作者简介：

王 睿 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力线通信; E-mail:wang_rui_185@163.com

杨仁刚 (1953-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化技术。