

高压电力线载波 COFDM 通信及编码技术的应用研究

周强,张承学,杨宇

(武汉大学电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 针对目前电力系统载波通信的现状,提出了一种基于编码正交频分复用调制技术的高压电力线载波数字通信系统,并讨论了 COFDM 系统中关于峰均功率比、同步、信道抗干扰编码问题及相应的解决方法。文中还通过计算机仿真测试了所提出的数字通信系统的误码率(BER)性能,取得一个比较好的结果,仿真结果证明该技术适合在高压电力线信道进行高速数据通信。

关键词: 电力线载波; 电力线通信; COFDM; 信道编码; RS/TCM

中图分类号: TM73;TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)08-0060-05

0 引言

当前使用机械强度坚固、系统资源丰富的高压电力输电线路,在 40 ~ 500 kHz 频带内进行载波通信是我国电力系统主要通信方式之一。从发展看,特别是电网复杂化,长距离输电的计算机实时自动化控制信息、图形化数据、活动图像数据、可视会议系统及现场环境实时监视等,都需要高速数字通信系统的支撑。虽然 220 kV 及其以上主干线路已经或即将架设 OPGW 或 ADSS 光缆,组建宽带综合业务数字网(B-ISDN)能够实现信息的高速传输,但由于工程造价问题,目前 35 kV 及以下电压等级线路还主要使用电力线载波。传统的电力线载波采用的是抑制载频的单边带(SSB)调制技术,存在传输速率低、频谱利用率低、抗干扰能力小的缺陷,无法适应电力系统高速数字通信发展的要求。

正交频分复用 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)调制技术是近十年发展起来的数字通信技术,最早应用在无线通信。由于其良好的抗干扰和抗多径效应能力,被认为是电力线通信中比较理想的调制方式。美国 Intellon 公司已经开发出高速电力线通信产品 PowerPacket™,在低压电力线上使用 4.3 ~ 20.9 MHz 频带可以取得 14 M bps 数据传输速率,误码率小于 10^{-7} [1]。相比于低压配电网,中、高压电力线网络结构简单,距离衰减特性好,噪声干扰较少。如果将 OFDM 与高性能的信道编码结合起来的 COFDM(Coded OFDM)技术应用于高压电力线载波通信,在现有频带内可以取得不低于 1.4 Mbps 传输速率,能够提供多路数字载波电话和高速数据通信服务,且易于将现有模拟载波机升级改造造成数字载波机,节省大量资金。

1 OFDM 基本原理及其在载波通信中的应用

正交频分复用技术的应用已有近 40 年的历史。早在 1962 年就有人提出带限正交信号多通道综合传输的思想,但以当时技术条件实现代价太大,直到 80 年代后期随着数字信号处理和微电子技术的快速发展才得以广泛应用。OFDM 技术是把所传输的高速数据流分解成若干个子比特流,每个子比特流具有较低的传输率,并且用这些低速数据流调制若干个子载波^[2]。通过选择合适的频率间隔,子载波相互保持正交。由于在各个低速率子信道同时传输数据,宽带传输系统可以转换成许多窄带系统,从而每个信道具有平坦的衰落,不需要进行频域均衡。为了取得较高的频谱效率,子信道的频率响应允许部分重叠,接收端能够根据特定的正交性约束来区分各个子载波。每个子载波可使用不同的调制方式,如 BPSK、QPSK 和 M-QAM 等。

1.1 OFDM 系统模型

目前,OFDM 技术在数字音频广播(DAB)、数字视频广播(DVB)、ADSL 和无线局域网(IEEE802.11a)等领域已得到广泛的应用。而对于电力系统高压输电线路载波而言,视频及数据信息,再通过 OFDM 调制方式在输电线上传输载波信号,具有传输速度快、抗多径干扰、频谱利用率高、误码率低的特点。

OFDM 系统构成如图 1 所示。输入的串行数据首先以 x 位一组转成并行数据,每组数据经过信号映射后成为一个复数 $X(n)$ 。复数经过 IFFT 运算以基带形式被调制,然后经过并/串转换以串行数据送出。符号间插入保护间隔 CP(或循环前缀 Cyclic Prefix)以避免多径失真产生的码间干扰 ISI(InterSymbol Interference)。这些离散符号经过

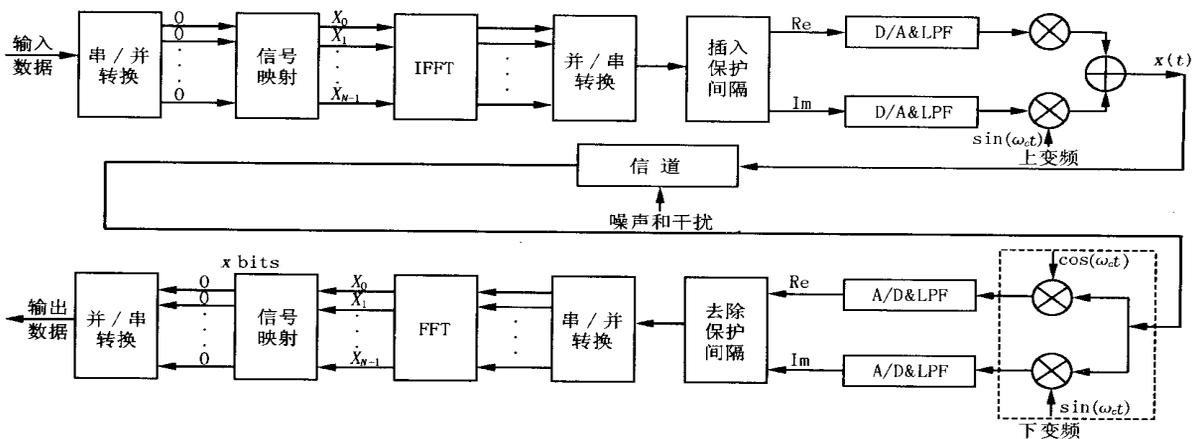


图1 OFDM系统结构图

Fig. 1 Structure of OFDM system

D/A 转换成模拟信号,再经过低通滤波,上变频送至信道发送。接收端完成发送端相反的过程。

假设 OFDM 系统占用的频带为 $[f_c, f_c + bw]$, 其中 f_c 是上变频频率,且所有的频率都处于 40 ~ 500 kHz 范围内。子载波频率间隔为 f ,子载波数目 $N = bw / f$ 。OFDM 符号周期 $T = 1/f$ 以保证正交性。第 n 个子载波频率为:

$$f_n = f_c + n f \quad n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

第 m 个被发送的 OFDM 信号波形可以描述成:

$$x_m(t) = \text{Re} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi f_n t} \right] = \cos(2\pi f_c t) \cdot \text{Re} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t / T} \right] - \sin(2\pi f_c t) \cdot \text{Im} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t / T} \right] \quad t \in [(m-1)T, mT] \quad (2)$$

$$\text{设 } y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t / T}, t \in [0, T]。$$

如果在一个 OFDM 符号周期 T 内, $y(t)$ 以 $f_s = 1/t$ ($t = T/N$) 频率被采样,可以得到 N 个采样点。设 $t = k t$, $nt/T = nk/N$, 则

$$y(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{j2\pi nk/N} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3)$$

式(3)正是序列 $\{X(n)\}$ 的 N 点 IDFT 结果,这表明 IDFT 运算可以完成 OFDM 基带调制过程。将 $\text{Re}[y(k)]$ 和 $\text{Im}[y(k)]$ 以时间间隔 t 送往 D/A 并通过低通滤波, $\text{Re}[y(t)]$ 和 $\text{Im}[y(t)]$ 即可在符号周期 T 内恢复,它们分别被上变频以适应信道传输。OFDM 系统的关键技术就是 IDFT 和 DFT^[3]。通常 OFDM 系统是基于高速 DSP 处理器,使用 IFFT/FFT 完成 IDFT/DFT 运算,利用数字信号处理技术完成调制/解调,大大降低了系统实现的复

杂度。

1.2 OFDM 优缺点及解决方法

在电力线载波通信中应用 OFDM 调制技术一个直接的好处在于接收端无需使用单载波系统的均衡器。实际上,高压电力线信道所具有的非线性特性,使得在一个很宽的频带内均衡是复杂且昂贵的。OFDM 技术能够克服信道非线性并减少了系统的复杂性。OFDM 系统可以将频率选择性衰落引起的突发性误码分配到不相关的子信道,从而变成随机性错误,使用前向纠错可有效地恢复信息。OFDM 系统还具有抗多径干扰、高频谱利用率、可调的高速数据传输率、抗御脉冲干扰、可调整子载波调制方式以适应信道等优点。使用信道编码技术的 COFDM 则进一步提高数字系统抗噪声性能,是一种能较好适应频带受限信道的高压电力线载波通信的调制技术。

OFDM 调制技术也存在一些缺点。其中一个关键问题是 OFDM 信号有一个很高的峰均功率比 PAPR (Peak to Average Power Ratio)。由于 OFDM 信号时域上表现为 N 个正交子载波信号的叠加,当这 N 个信号恰好均以峰值相加时,OFDM 信号也将产生最大峰值,该峰值功率是平均功率的 N 倍。为了不失真地传输这些高峰均功率比的 OFDM 信号,发送端的高功率放大器必须工作在一个很大的线性区间内。否则,信号峰值进入功率放大器的非线性区间将造成信号衰落并引起子载波互调和频带扩散,使得 OFDM 系统的性能大大下降甚至直接影响实际应用。为了解决这一问题,人们提出了基于信号畸变技术、信号扰码技术和基于信号空间扩展等降低 PAPR 的方法。但是在减小 PAPR 的同时,大多数方

法都无法在复杂性、编码效率和性能降低等方面取得均衡。对于高压电力线 OFDM 系统比较简单且实用的方法是使用信道编码和带削峰的带通滤波器^[4]。由于高峰值发生的概率很小,该方法提高了误码率的性能和频谱利用率且实现相对简单。带通滤波器的削峰是一个非线性过程,会造成频带内失真和频带外噪声,但依靠高性能的信道编码可将削峰造成的干扰和噪声降低到一个很低的水平。

OFDM 系统应用另一个关键问题是接收端必须对输入信号进行正确的采样。多载波系统对时间偏差的敏感比单载波系统高的多。常用的一种同步方法是接收端依靠已知的导航符号判断 OFDM 符号的起始位置,但需牺牲一定的频带。OFDM 系统可以利用发送信号中的冗余信息进行同步。由于 CP 是 OFDM 符号(N 个采样长度)最后 L 个采样的重复并作为 OFDM 符号的前导,CP 包含的冗余信息可以利用来同步。有人提出了 OFDM 系统关于符号时间和频率的联合最大似然估计算法^[5]。假设得到了 $2N + L$ 个连续的采样并且这些采样包括了一个完整的长度为 $N + L$ 的 OFDM 符号。通过计算相邻采样序列 $\{r(k)\}$ 和 $\{r(k + N)\}$ ($k = 0, 1, \dots, L - 1$) 相关系数的最大似然函数,就能确定 OFDM 符号的第一个采样点的起始位置。比较而言,这种方法无需使用导航符号,不占用频带资源且不会降低数据传输率,而且相关运算对于 DSP 器件用软件实现较容易,效率也高。这种利用 CP 同步的方法,对于频带资源有限的高压电力线载波通信来说也是比较合适的。

2 信道编码

一个可靠的数字通信系统误码率必须很小。在载波通信中,增大发射功率提高信道信噪比能提高通信性能,但也可以使用合适的差错控制技术来替代。在载波通信中,由于受到来自电网结构变换、无线干扰、电磁辐射及其线路本身噪声和频率选择性衰落的影响,载波机实际接收的波形与理想波形存在一定的差异。如果没有使用差错控制技术,当差异超过一定的界限,载波机不能恢复原始信号,导致出现大量误码,通信传输失败。

在高压电力线 OFDM 通信中,我们选择的差错控制技术是前向纠错法,这只需要单向链路,在纠错范围之内,监督比特检错并纠正错误。系统具体的信道编码方案是级联交织码,即外码 RS(Reed-Solomon)码,内码是格状编码调制

TCM(Trellis coded modulation)。其中内码纠正随机错误,外码纠正由信道或内码引起的突发错误。通过使用 Matlab 仿真和编码实现难易程度的比较,我们选择了合适的高压电力线信道编码参数。级联信道编码方案如图 2 所示。下面分别介绍 TCM 码、RS 码和数字交织技术。

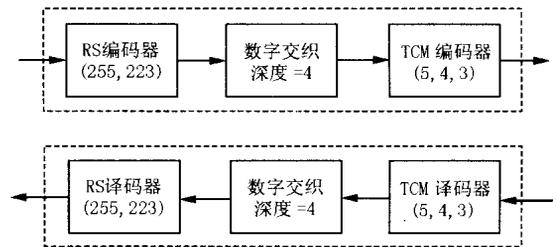


图 2 信道编码方案

Fig. 2 Channel coding scheme

2.1 TCM 码

1982 年 Ungerboeck 提出 TCM 码将编码和调制结合在一起,在不增加频率带宽条件下,可提供 36 dB 的编码增益,非常适用于频带受限系统。其主要思想是采取编码方法最优划分信号空间,使得调制信号空间矢量点之间有最大欧氏距离。同时,采用了足够多的信号矢量以确保信息传输速率。因此,它能够在保证数据传输率的同时降低误码率。TCM 与 OFDM 调制技术可以很好有效地结合起来,在 TCM 编码阶段就完成了 OFDM 系统中信号映射过程。

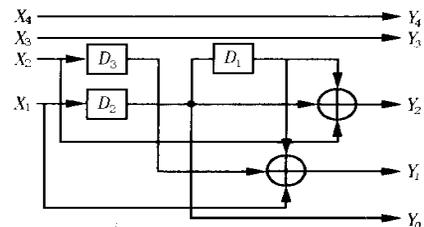


图 3 8 状态 32-QAM TCM 编码器

Fig. 3 8-state rate 4/5 TCM encoder for 32-QAM

根据图 3,每次编码器输入 $k = 4$ 位信息,其中 $k = 2$ 位经过效率为 $k / (k + 1)$ 的二进制卷积码编码器扩展成 $k + 1 = 3$ 位。由集分割原理,这 $k + 1$ 位用于选择 2^{k+1} 个信号子集的其中一个子集,余下的未编码的 $k - k$ 选择该信号子集 2^{k-k} 个信号中的一个信号。编码器输出 $k + 1 = 5$ 位信息,用于选择 32-QAM 星座图中的一个信号点(一个复数 $X(n)$)。假设经过 TCM 编码调制后的信号序列叠加高斯白噪声,接收端可以采取最大似然解调和译码,通过维特比算法(Viterbi Algorithm)找出最佳栅格路径,计算出发送信号序列并重建被信道破坏的数据。TCM 译

码通常计算欧氏距离并使用软判决提高编码增益,可利用通用高速 DSP 器件实现,如 TMS320C54X 系列,其内部有专门硬件支持 Viterbi 译码。

2.2 RS 码

RS 码是非二进制循环码,该码距离特性好,是极大最小距离码。一个 RS 码可以定义为 $RS(N, K)$,每个码元由 $m(N = 2^m - 1)$ 个比特组成。RS 码非常适合于纠正突发性错误,一个 RS 码字可纠正 t 个码元错误($2t = N - K$)。如 $RS(255, 223)$ 译码器最多可以纠正 $t \times m = 16 \times 8$ 位错误。另外,RS 译码存在一种有效的硬判决译码方法,使得在许多需要长码的应用场合,该码能被实现。RS 的编码和译码可以通过软件或硬件实现。根据 RS 编码及其译码原理,利用 CPLD 或者 FPGA 器件中的逻辑门搭建电路完成有限域的运算是十分快速且方便的,可使用 VHDL 语言完成编码/译码器的设计。

2.3 数字交织

处理突发性错误信道一个有效的方法就是数字交织,这样突发性信道转成含有独立错误的信道,便于使用 TCM 译码纠正错误。交织器可以用块结构实现,数据以 $m \times n$ 的矩形格式存储。发送端按列读出数据然后发送。接收端的解交织器以相同的矩形格式存放数据,但是按行读出。

3 COFDM 系统仿真及误码率分析

本节针对一个含有具体参数的高压电力线载波 COFDM 通信系统进行了计算机仿真和误码率分析。表 1 列出该系统建议参数。整个系统的有效数据传输率为 $S = N \times \log_2(M) \times (4/5) \times (223/255) / (T + T_c) = 1.46 \text{ Mbps}$ 。这里每个子载波使用相同的 M-QAM 调制, $M = 32$ 。如果使用更高的 64-QAM 或 128-QAM,系统传输速率还可以继续提高。

表 1 COFDM 系统建议参数

Tab. 1 Parameters of COFDM system

有效数据传输率	$S = 1.46 \text{ Mbps}$
子载波数目	$N = 115$
系统带宽	$bw = 460 \text{ kHz}$
FFT 点数	128
调制方式	32 - QAM
OFDM 符号周期	$T = 250 \mu\text{s}$
循环前缀时间	$T_c = 25 \mu\text{s}$
子载波频率间隔	4 kHz
TCM 码	(5, 4, 3)
RS 码	(255, 223)
频谱效率	$3.2 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$

这里我们使用了蒙特卡罗模型分析误码率。理想情况下,BER 必须是各种信道及任意随机数据和噪声源情况下的统计平均,并且仿真的数据长度必须足够长。由于时间限制,我们只研究了 AWGN 信道且仿真长度是 10^7 位。对表 1 所提出的 COFDM 系统,我们使用不同编码方案,研究 BER 与信噪比 E_b/N_0 的关系,结果如图 4 所示。仿真结果由 3 部分组成:TCM-32QAM(上线),RS/TCM-32QAM(中线)和带交织的 RS/TCM-32QAM(下线)。

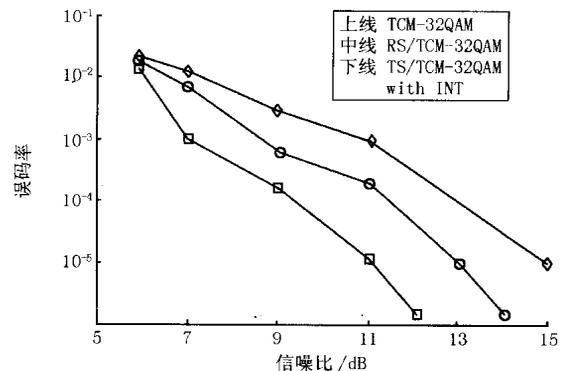


图 4 AWGN 信道 COFDM 系统的 BER 特性

Fig. 4 BER performance of COFDM system on AWGN channel

从图 4 可以看到,首先,没有 RS 编码的 COFDM 系统在 BER 为 10^{-5} 时必须增加约 2 dB 的信噪比。换言之,RS 编码可以提供约 2 dB 的编码增益,这是由于某些突发性的错误被 RS 码纠正。其次,交织技术在将突发性错误转成随机错误传给内码译码器起到很重要的作用,带交织的级联码在 BER 为 10^{-5} 处产生了大约 4 dB 的编码增益。总之,表 1 的 COFDM 系统在信噪比约为 11 dB 时 BER 为 10^{-5} ,按照图中曲线变化趋势,在信噪比约为 20 dB 时 BER 可以降到 10^{-6} 。而实际高压电力线载波通信系统中信道的信噪比大致为 40-50 dB。这表明所建议的 COFDM 载波通信系统在实际高信噪比条件下还可以进一步降低 BER ($< 10^{-6}$),或在保证一定 BER 条件下降低载波机发射功率,这对于提高数字通信系统性能和减少对其他通信方式的干扰都有重要意义。

4 结论

通过理论分析和计算机仿真,在高压电力线载波通信系统应用 COFDM 调制技术是可行并且能取得一个较高的数字传输速率。使用高性能的信道编码可以进一步降低载波机的发射功率和误码率。该项技术可以指导新型高压电力线载波机研发或模拟

载波机改造。

参考文献:

- [1] Intellon Corp. Intellon High Speed Powerline Communications[Z]. 1999.
- [2] 姚轶 (YAO Yi). 利用 OFDM 技术在低压电力线上实现高数数据传输 (High-Speed Data Communication Over Low-voltage Power Line with OFDM Technology) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(8): 65-68.
- [3] 毛婕 (MAO Jie). 基于 OFDM 的电力线数据传输通信系统 (The Powerline Digital Communication System Based on OFDM) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2002, 29(4): 80-83.

- [4] Li X. Effects of Clipping and Filtering on the Performance of OFDM[J]. Communication Letters, 1998, 2(5): 131-133.
- [5] van de Beek J J. ML Estimation of Time and Frequency Offset in OFDM Systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1997, 45(7): 1800-1805.

收稿日期: 2003-07-29; 修回日期: 2003-11-29

作者简介:

周强 (1979 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化;

张承学 (1952 -), 男, 教授, 主要从事电力系统监控及自动化方面的研究;

杨宇 (1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化。

Application research on COFDM modulation and channel coding technology on the high-voltage power line carrier communication

ZHOU Qiang, ZHANG Cheng-xue, YANG Yu

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, a power line carrier (PLC) communication system based on a type of coded orthogonal frequency division multiplexing (COFDM) modulation is presented. Some application problems in the COFDM system such as PAPR, synchronization, and channel anti-interference coding are discussed and relevant solving scheme is put forward. The performance of the proposed system with parameters is investigated through computer simulation. A good bit error rate (BER) result is observed. Simulation results show that high-data communication could be carried out with the proposed technology in high-voltage power line channels.

Key words: power line carrier; power line communication; COFDM; channel coding; RS/TCM

电工行业黄金期也有隐忧

2003年我国电工行业主要经济指标快速增长,在产销两旺的形势下,一些问题也日益凸显,诸如在交货期上承受压力不断增大、原材料价格大幅上涨、电工商品出口贸易磨擦不断增多等等。

近年来,国家电力建设步伐的不断加快,拉动了我国电工行业快速发展,去年电工行业工业总产值、销售收入、工业增加值同比分别增长 27.65%、29.22% 和 22.6%,产量增速均创历史新高,全行业产销两旺;经济效益大幅提高,利润总额继续稳居机械行业第二位;进出口贸易活跃,出口额增幅明显;骨干企业任务饱满,合同额比上年同期有大幅增长。

未来几年,电工行业的发展空间更加广阔。据了解,2005年、2010年和2020年我国发电设备总装机容量将分别达到4.3亿kW、6.3亿kW和9.6亿kW。今年新开工电站项目4000万千瓦,预计投产电站规模超过3700万kW。随着市场需求的不断增长,对电工产品的技术和质量也提出了更高的要求。

强劲的市场需求造就了我国电工行业发展的黄金时期,也预示着今后的任务将十分艰巨。对此,中国机械工业联合会常务副会长、中国电器工业协会名誉理事长陆燕荪强调指出:如果盲目乐观,求速度、轻质量,不紧紧抓住机遇,做好企业基础工作,加快技术创新步伐,将会严重影响电工行业健康发展,可谓“不先则后、不进则退、适者生存、顺之则昌”。他还提出要进一步加强行业团结协作,进一步发挥行业协会的作用,真正做到“协会搭台、企业唱戏”。