

基于 COFDM 的高速电力载波通信及其 SystemView 仿真

杨兴国¹, 郭 勇²

(1. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 传统电力线载波机已经越来越不能满足实际的需要, 而基于编码正交频分复用(COFDM)调制技术的载波机可实现高速数据通信。介绍了 COFDM 技术的核心调制正交频分复用技术(OFDM), 其基本原理是将编码后的串行数据转换为并行数据, 采用频率上等间隔的 N 个载波分别调制, 调制后的 N 个子载波信号相加后同时发送。信号编码采用外码 RS(Reed-Solomon), 内码为 TCM(Trellis Coded Modulation)的级联纠错编码。采用 SystemView 仿真软件对电力线信道模型的误码率性能作了仿真, 结果表明电力线载波系统 COFDM 调制技术是可行的, 能实现良好的通信。

关键词: 编码正交频分复用; RS 码; 交织; TCM 码; SystemView

中图分类号: TM 712; TP 84⁺1

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)09-0082-04

0 引言

基于编码正交频分复用(COFDM)调制技术的载波机使用数据压缩、数据编码等技术处理信号, 再通过正交频分复用技术(OFDM)调制方式在电力线上传输高频信号, 在接收端恢复信号。相比传统载波机, 该方式具有传输速率快、抗多径干扰、频谱利用率高及误码率低的特点, 能有效弥补传统载波机的不足, 适合在高压电力线上进行高速数据通信。此外, 利用 COFDM 调制模块直接对现有的载波机进行技术升级和改造较容易, 只需更换原先的单边带调制模块即可实现, 节省资金, 具有较好的经济效益。另一方面, 电力线通信(PLC)提供了一种理想的家庭宽带通信方式。利用改进的 OFDM 技术已在低压电力线上实现了 11 Mbit/s 的高速率数据传输, 其误码率小于 10^{-7} 。因此, 研制开发出新型数字电力线载波机是发展电力载波通信的一个方向。

1 COFDM 技术及其在载波通信中应用

COFDM 是一种新型高效高速多载波调制技术, 它使用多种信道编码方法, 对信号源数据进行一系列的信道纠错保护措施, 它的核心调制是 OFDM。

1.1 OFDM 基本原理^[1-2]

OFDM 的基本原理是将编码后的串行数据转换为并行数据, 采用频率上等间隔的 N 个载波分别调制, 再将调制后的 N 个子载波的信号相加后同时发送, 这样每个符号的频谱只占用信道带宽的一小部分。通过选择载波间隔, 使这些子载波在整个符号

周期上保持频谱的正交性, 各子载波上的信号在频谱上相互重叠, 接收端利用载波间的正交性可以无失真地恢复信息。

在发送端, 串行码元序列 $d_0, d_1, \dots, d_{N-1}$ 先实现数字基带调制, 然后进行串/并转换。经过分路后的 N 路子信道码元的周期 T 从 Δt 增加到 $N\Delta t$, 分别调制在 N 个子载波 $f_0, f_1, \dots, f_{N-1}$ 上。 f_0 为最低子载波频率, 相邻子载波频率相差 $1/T$, 所以 N 个子载波可表示为

$$f_n = f_0 + n/T \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

第 m 个被发送的 OFDM 信号可表示为

$$x_m(t) = \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi f_n t} \right] = \cos(2\pi f_0 t) \operatorname{Re} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t/T} \right] - \sin(2\pi f_0 t) \operatorname{Im} \left[\sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t/T} \right] \quad (2)$$

$$t \in [(m-1)T, mT]$$

设 $y(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{j2\pi n t/T}$, $t \in [0, T]$, 如果在 1 个 OFDM 符号周期 T 内, $y(t)$ 以 $f_s = 1/T$ ($t = T/N$) 频率被采样, 可得 N 个采样点。设 $t = kt$, $nt/T = nk/N$, 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 点离散傅里叶逆变换(IDFT)结果, 这表明 IDFT 运算可以完成 OFDM 基带调制过程, 而它的解调过程可通过离散傅里叶变换(DFT)实现。因此, OFDM 系统的调制和解调过程等效于 IDFT 和 DFT。

OFDM 技术^[3]在电力有线通信上体现出 3 个优越性^[4]。

a. 频带利用率高。按照双工通信将 40~500 kHz 划分出 2 个频带,中间预留一定频带间隔,OFDM 传输系统可以提供大约 1~2 Mbit/s 的信道容量,这是模拟载波通信达不到的。

b. 抗脉冲干扰能力强。在 OFDM 信号发送过程中,数据符号串/并变换会使每个子载波上的 OFDM 符号周期相对地增加,可以减轻由电力线信道的多径时延扩展所产生的时间弥散性对系统造成的影响。一般地,OFDM 系统中插入的保护间隔(即循环前缀)大于信道的最大时延扩展,这样可以最大限度地消除由于多径时延带来的符号间干扰。

c. 抗信道衰落。虽然电力线信道的阻抗较小,一般为 2~10 Ω,但是随着频率和位置的不同,其阻抗会在 0.1~100 Ω 的范围内呈现 1 000 倍的变化。由电力线阻抗剧烈变化而产生的这种频率选择性衰落,对传输信号会产生严重的衰减。而通过使用部分少数子载波来承载的导频信号,OFDM 技术不仅可以利用其解调信号进行电力线信道均衡,还可以用于检测子载波信道的衰落程度,判断该子载波信道是否可用,并且 OFDM 还可通过关闭部分子信道克服电力线信道频率选择性衰落。

1.2 信道编码^[5-6]

COFDM 技术运用于电力线载波通信需解决的关键问题之一,就是如何将 OFDM 调制技术结合性能优越的前向纠错(FEC)信道编码,来进一步提高系统抗噪声性能,以期在相同的信噪比(SNR)条件下明显地降低误码率,提高通信的传输速率及可靠性。

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替代。在载波通信中^[5],由于电力线信道是高噪声、多径和衰落信道,会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。经仔细研究论证,在信道编码环节,采用了外码为 RS(Reed-Solomon)、内码为 TCM^[6](Trellis Coded Modulation)的级联纠错编码。TCM 编码技术在保证频带性能的情况下能有效地降低数字传输误码率。而 RS 编码有很强的抗突发错误的能力,两者的结合明显地降低了误码率。级联信道编码方案如图 1 所示。

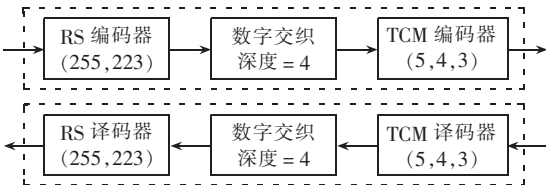


图 1 信道编码

Fig.1 Channel coding

1.2.1 TCM 码

TCM 是调制解调与纠错编码有机的结合体。它采用编码方法将信号空间作最佳分割,使得已调信号矢量点间有最大的距离,同时采用足够多的信号矢量以保证信息传输速率。理论上,在不增加带宽条件下,可提供 3~6 dB 的编码增益,非常适合于频带受限系统,可以克服传统数字传输系统中功率/频谱利用率低的缺点。将其与 OFDM 技术结合,可以在不牺牲频带性能的情况下,明显降低数字传输误码率。

1.2.2 RS 码

RS 码是非二进制循环码,该码距离特性好,是极大最小距离码也就是 RS 码的最小距离 d 、信息长度 k 以及码字长度 n 满足: $d=n-k+1$ 。1 个 RS 码可定义为 $RS(N,K)$,每个码元由 $m(N=2^m-1)$ 个比特组成。RS 码非常适合于在衰落信道中纠正突发性错误,1 个 RS 码字可纠正 t 个码元错误 ($2t=N-K$)。如 $RS(255,223)$ 译码器最多可纠正 $t \times m = 16 \times 8$ bit 错误。编译码器的实现方法多种多样:从软件到硬件,从可用的知识产权 IP(Intellectual Property)核到专用的集成电路(ASIC)芯片。实现方式主要有以下几种:微处理器实现的 RS 码编译码;数字信号处理器(DSP)实现的 RS 码编译码;ASIC 实现的 RS 码编译码;现场可编程门阵列(FPGA)实现的 RS 编译码;专用的 RS 码编译码芯片等。

数字交织^[9]是处理突发性错误信道的有效方法,可将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。在本次设计中用到的是分块交织(即行列交织),分块交织器是最简单的一类交织器,它的交织映射过程为:将数据序列按行的顺序定入 $m \times n$ 矩阵,然后按列的顺序读出,即完成交织;相应的解交织过程就是将交织后的数据序列的顺序写入,然后按行的顺序读出即可。

1.3 COFDM 载波通信实现方法^[10]

COFDM 载波通信传输整个流程是:将各种经过信源编码、数据压缩处理后的信息进行以 RS 为外码、TCM 为内码的级联纠错编码,然后将高速数据流通过串/并转换器分解成 N 个低速数据块,对每路低速数据进行基带调制(可采用 BPSK、QPSK、QAM 等),接下来通过快速傅里叶逆变换(IFFT)将基带调制信号搬到 N 路子载波上合路后发送。信号通过叠加了各种噪声和干扰的信道传递到接收端。在接收端的处理就是上述发送端过程的逆过程,经 A/D 转换以后,再通过快速傅里叶变换(FFT)恢复信号,并应用相应的解调方式解调出 N 路低速数据,最后,通过并/串转换解码得到原始高速数据流。详细流程如图 2 所示。

图中,OFDM 部分采用加入保护前缀的方法,即复制 OFDM 符号最后面的样点到最前面,这样可有效地抵抗多径衰落的影响。OFDM 系统的调制解调过程等效于 IDFT 和 DFT 处理。频域数据在经过 IFFT 后就得到了时域数据,这相当于进行了 OFDM 调

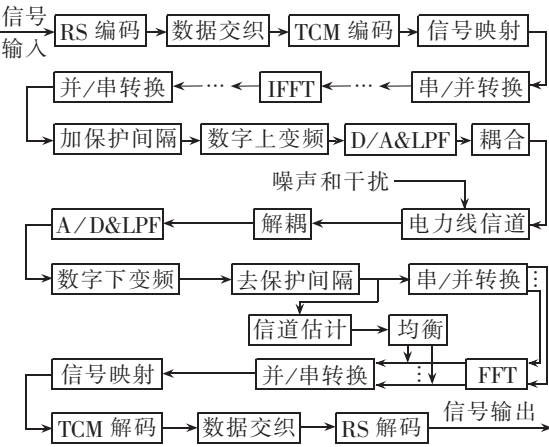


图 2 COFDM 载波通信流程图

Fig.2 Flow of COFDM carrier communication

制。然后,输出的时域数据经过 D/A 转换后送入信道。在进行基带传输时,就不再需要上变频。接收端进行与发送端相反的过程。

2 COFDM 系统 SystemView 仿真及误码率^[9]

SystemView 是美国 Elanix 公司设计开发的信号级的系统仿真软件,主要用于电路与通信系统的设计、仿真,是一个强有力的动态系统分析工具,能满足从数字信号处理、滤波器设计、直到复杂的通信系统等不同层次的设计、仿真要求。SystemView 以模块化和交互式的界面,在 Windows 窗口环境下,为用户提供了一个嵌入式的分析引擎。使用 SystemView 只需要关心项目的设计思想和过程,用鼠标器点击图标即可完成复杂系统的建模、设计和测试,而不必花费大量时间编程建立系统仿真模型。

SystemView 主要有诸多特点。

- a. 能仿真大量的应用系统,能在 DSP、通信和控制系统应用中构造复杂的模拟、数字、混合和多速率系统。
- b. 快速方便的动态系统设计与仿真。System-View 可快速建立和修改系统,并在对话框内快速访问和调整参数,实时修改、实时显示。
- c. 在报告中方便地加入 SystemView 的结论。生成的 SystemView 系统和输出的波形图可以很方便地使用复制(copy)和粘贴(paste)命令插入微软 Word 等文字处理器。
- d. 提供基于组织结构图方式的设计。通过利用 SystemView 中的图符和 MetaSystem(子系统)对象的无限制分层结构功能, SystemView 能很容易地建立复杂的系统。
- e. 多速率系统和并行系统。SystemView 允许合并多种数据采样率输入的系统,以简化有限长冲激响应(FIR)滤波器的执行。
- f. 完备的滤波器和线性系统设计。SystemView 包含一个图形模板设计模拟和数字以及离散和连

续时间系统的环境,还包含大量的 FIR/无限长冲激响应(IIR)滤波类型和 FFT 类型,并提供易于用 DSP 实现滤波器或线性系统的参数。

- g. 先进的信号分析和数据块处理。SystemView 提供的分析窗口是一个能够提供系统波形详细检查的交互式可视环境。分析窗口还提供一个能对仿真生成数据进行先进的块处理操作的接收计算器。
- h. 可扩展性。SystemView 允许用户插入自己用 C/C++编写的用户代码库,插入的用户库自动集成到 SystemView 中,如同系统内建的库一样使用。
- i. 完善的自我诊断功能。SystemView 能自动执行系统连接检查,通知用户连接出错并通过显示指出出错的图符。

利用 SystemView 对 COFDM 调制解调过程进行了仿真和误码率分析。表 1 列出该系统的仿真参数。这里每个子载波使用相同的 M—正交幅度调制,M 越大系统传输速率越大。表中, N 为每符号比特数, h 为交织深度, T_{of} 为 OFDM 符号周期, t_c 为循环前缀时间, n 为多径信道数, M_s 为基带调制方式, N_s 为子载波数, n_f 为每帧 OFDM 符号数, Δf 为子载波频率间隔, f_{max} 为最大多普勒频移。

表 1 仿真参数
Tab.1 Parameters for simulation

N/bit	h	TCM 码	T_{of}/ms	t_c/ms	n
8	4	5,4,3	250	25	4
RS	M_s	N_s	n_f	$\Delta f/kHz$	f_{max}/Hz
255					
233	16-QAM	64	16	4	200
16					

对表中所提出的 COFDM 系统,使用不同编码方案,研究误码率 K_{ber} 与信噪比 SNR 的关系,结果如图 3 所示。

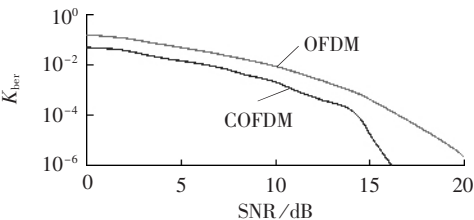


图 3 COFDM 系统的 BER 特性

Fig.3 BER performance of COFDM system

从图 3 可看出,COFDM 系统在信噪比约为 15 dB 时 K_{ber} 为 10^{-5} ,在信噪比约为 16 dB 时 K_{ber} 降到 10^{-6} 。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进一步降低 K_{ber} ($<10^{-6}$),或在保证一定 K_{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。而 OFDM 系统在信噪比约为 18.5 dB 时 K_{ber} 为 10^{-5} ,在信噪比约为 20.5 dB 时 K_{ber} 降到 10^{-6} ,说明在 OFDM 基础上产生的 COFDM 在对抗多径衰落、突发脉冲方面要比 OFDM 优越。

3 结语

通过理论分析和计算机仿真,在电力线载波通信系统应用 COFDM 调制技术是可行的,且能实现传输速率快、抗多径干扰、频谱利用率高及误码率低等特性。使用高性能的信道编码可进一步降低载波机的发射功率和误码率。在低压电力线介质上,传统的通信、调制技术只能传输低速数据,而 OFDM 技术是实现高速数据传输的最有效手段之一。为了提高 OFDM 性能,在实际的应用中^[10],还需要解决时域和频域的同步、信道的估计、信道编码和交织、降低峰值平均功率比(PARP)等关键问题。上述仿真只实现了信道编码和交织技术,今后将在此次仿真的基础上进一步完善 COFDM 系统的仿真,实现时域和频域的同步、信道的估计、降低 PARP 等技术。

参考文献:

[1] 佟学俭. OFDM 移动通信技术原理[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.

[2] 赵天恩,陈启美,邹志威. 跻身未来的电力线通信(四)宽带 PLC 的 W-OFDM 实现[J]. 电力系统自动化,2003,27(7):77-81.

ZHAO Tian-en,CHEN Qi-mei,ZOU Zhi-wei. Predictive schemes for future PLC(part four) the realization of broad-band PLC using W-OFDM[J]. Automation of Electric Power Systems,2003, 27(7): 77-81.

[3] 陈长德,刘海涛,张保会. OFDM 调制技术在宽带高速电力线通信中的应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(18):55-59.

CHEN Chang-de,LIU Hai-tao,ZHANG Bao-hui. Application of OFDM modulation in power line telecommunication[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(18):55-59.

[4] 姚轶,邵军力. 利用 OFDM 技术在低压电力线上实现高速数据传输[J]. 电力系统自动化,2001,25(11):65-68.

YAO Yi,SHAO Jun-li. High-speed data communication over low-voltage power line with OFDM technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(11):65-68.

[5] PROKIS J G. Digital communications[M]. 4th ed. New York:Mc Graw-Hill Press,2001.

[6] 周强,张承学,杨宇. 高压电力线载波 COFDM 通信及编码技术的应用研究[J]. 继电器,2004,32(8):62-63.

ZHOU Qiang,ZHANG Cheng-xue,YANG Yu. Application research on COFDM modulation and channel coding technology on the high-voltage power line carrier communication[J]. Relay, 2004,32(8):62-63.

[7] 陈天华. PLC 宽带通信技术及电磁辐射研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(7):28-31.

CHEN Tian-hua. Research on PLC broadband access technology and its electromagnetic radiation[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(7):28-31.

[8] 黄芝平,李鹏,钟晓鹏. 基于网格编码调制(TCM)的维特比译码实现[J]. 电子质量,2001(12):84-87.

HUANG Zhi-ping,LI Peng,ZHONG Xiao-peng. The achievement of Viterbi decoder based on trellis coded modulation[J]. Electronics Quality,2001(12):84-87.

[9] 王俊峰. 交织技术用于提高无线传输高速列车控制数据实时性的研究[J]. 移动通信,2001(2):38-41.

WANG Jun-feng. The research about using interleaving technique to improve the realtime property in wireless transmission of bullet train control data[J]. Mobile Communications,2001(2):38-41.

[10] 樊昌信,张普翊,徐炳祥,等. 通信原理[M]. 5 版. 北京:国防工业出版社,2001.

[11] 罗卫兵,孙桦,张捷. SystemView 动态系统分析及通信系统仿真设计[M]. 西安:电子科技大学出版社,2001.

[12] 宋鑫. OFDM 系统中的关键技术[J]. 中国科技信息,2005(16): 17-18.

SONG Xin. Key techniques of OFDM[J]. China Science and Technology Information,2005(16):17-18.

(责任编辑:汪仪珍)



杨兴国

作者简介:

杨兴国(1971-),男,四川安岳人,硕士研究生,主要研究方向为信息采集与处理(E-mail:liyngyxg@163.com);

郭勇(1961-),男,四川内江人,教授,研究方向为信息与信号处理。

COFDM-based high-speed carrier communication on power line and its simulation with SystemView

YANG Xing-guo¹,GUO Yong²

- (1.College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology,Chengdu 610059,China;
2.College of Information Engineering,Chengdu University of Technology,Chengdu 610059,China)

Abstract: The traditional carrier wave transmitter does not meet practical demands,while the COFDM(Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulation technique helps to realize high-speed data communication. OFDM,as its core,transforms serial coding data into parallel data and modulates them respectively by N carrier waves with same frequency intervals. The modulated N child carrier waves are then superposed together and transmitted simultaneously. The cascade correcting code of outer RS(Reed-Solomon) code concatenated with inner TCM(Trellis Coded Modulation) code is adopted for signal coding. The performance of error rate over power line channel is simulated with SystemView,and results testify that the power line carrier system based on the technique of COFDM is feasible to achieve excellent communication.

Key words: COFDM; RS codes; interweaver; TCM codes; SystemView