

电力线通信中的预编码 OFDM 技术

孟玉洁, 郝颖, 贾怀义

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 根据多径效应对电力线信道模型的影响, 介绍了一种基于多径衰落的信道模型, 并分析了多径传播造成的频谱零点对 OFDM 系统性能的影响。传统的编码方法不能解决频谱零点问题, 为了解决此问题, 介绍了一种预编码 OFDM 系统, 它能有效地改善有频谱零点的 PLC 信道的 OFDM 系统性能。并通过实例和仿真比较了预编码 OFDM 系统和卷积码 OFDM 系统的误比特性能。

关键词: 电力线通信; 卷积码; 预编码 OFDM; 频谱零点

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0041-04

0 引言

随着社会信息化程度的提高, 人们对信息的需求已从单纯的数据信息向交互式多媒体信息发展, 迫切希望获得大容量和高速率的数据、视频、图像等宽带业务。电力线通信是直接利用现有的配电网通信, 不需要另外铺设新线, 同时可对家用电器实现远程控制, 具有成本低、接入方便等优点。

本文首先介绍了一个已有的电力线信道模型, 分析了传统的 OFDM 系统编码方法的局限性, 为了解决电力线信道中存在的频谱零点问题, 介绍了一种新的编码方法——预编码 OFDM 技术, 它能有效地改善有频谱零点的 PLC 信道的 OFDM 系统性能。并通过实例和仿真比较了预编码 OFDM 系统和编码 OFDM 系统的误比特性能。

1 电力线信道模型

由于低压电力线是非均匀不平衡的传输线, 所连接的负载阻抗也处在不断变化之中, 信号会遇到反射、驻波等复杂现象。因此, 信号可能经过不同的路径到达目的地, 当信号以微小的时间差到达接收机时, 就会产生干扰, 从而造成频率选择性衰落。而且, 当传输速率很高时, 由于信号的码元周期较短, 码元若经过不同的路径到达接受机, 所用时间不同, 极易造成码元间的相互干扰, 产生码间干扰 (ISI)。与无线信道不同, 电力线信道中由多径反射产生的时延一般可以认为是一个常数。

因此, 由文献 [2] 可知, 采用多径传播模型能很好地表示信道传输特性, 忽略信道的时变特性, 多径传播模型的传输函数数学表示^[2]如下:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N a_i e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 |f|)^{\beta_1}} e^{-j2\pi f \tau_i} e^{-j2\pi f \tau_p} \quad (1)$$

其中: i 为信号能够到达接收机的路径数, 称为多径数; α_0 和 α_1 是衰减系数; β_1 是衰减因子的指数 (值在 0.2 到 1 之间); a_i 是第 i 条路径的衰减系数; τ_p 是传播速度。

图 1 显示了测量的参考信道的频率响应。

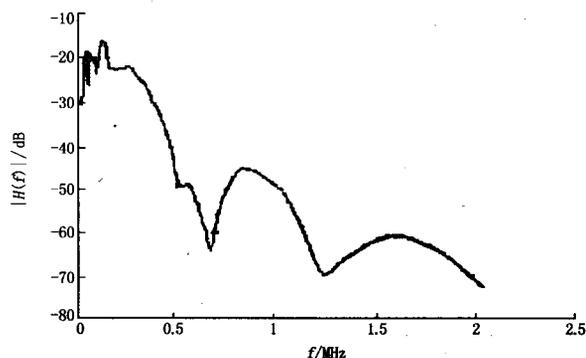


图 1 测量的参考信道的频率响应

Fig 1 Frequency response of measured reference channel

2 预编码 OFDM 技术

2.1 编码 OFDM 的局限性

为了在电力线网络通信中获得 Mbps 级的高速数据率, 采用了 OFDM 技术作为新的调制技术, 此技术在无线通信系统中应用广泛。通过采用循环前缀, OFDM 能抗 PLC 信道中的 ISI 干扰。图 2 给出了一个传统的 OFDM 系统。

其中: $x(n)$ 表示信息符号序列; N 是 OFDM 系统中的载波个数; $H(z)$ 是 PLC 信道的传输函数, 且

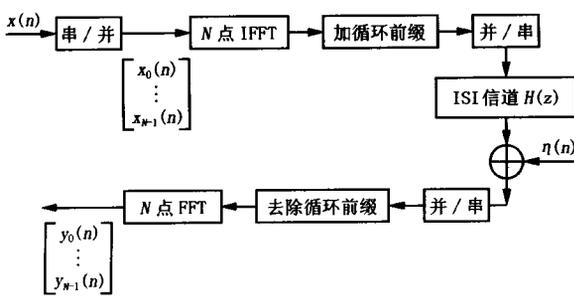


图 2 传统的 OFDM 系统

Fig 2 Conventional OFDM system

$$H(z) = \sum_{n=0}^L h(n) z^{-n}, h(n) \text{ 是 ISI 信道的脉冲响应。}$$

为 OFDM 系统中的循环前缀长度且 L_0 。 (n) 表示均值为零, 方差 $\sigma^2 = N_0/2$ 的加性高斯白噪声, N_0 是噪声 (n) 的单边带功率谱密度。假如 $r(n)$ 为接收端的接收信号, $y(n)$ 为经过 FFT 后的接收信号, 则 $y(n)$ 可以表示^[3]如下:

$$y_k(n) = H_k x_k(n) + \eta_k(n), \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中: $q_k(n)$ 表示 $q(n)$ 第 k 路子载波。例如 $(q(n))_n = (q_0(n), q_1(n), \dots, q_{N-1}(n))_n$, q 代表 x, y 和 (n) 是噪声 (n) 的 FFT, 因此与 (n) 有着同样的统计特性, 且

$$H_k = H(z) |_{z=\exp(j2\pi k/N)} \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

通过式 (2) 可看出, 接收端需要从 $y_k(n)$ 中分离出有用信号 $x_k(n)$, 只要循环前缀的长度大于等于信道的脉冲响应长度 L , 我们就能把有 ISI 干扰的信道 $H(z)$ 变成 N 个没有 ISI 干扰的子信道 H_k 。

在传统的 OFDM 系统中, 为了提高误比特性

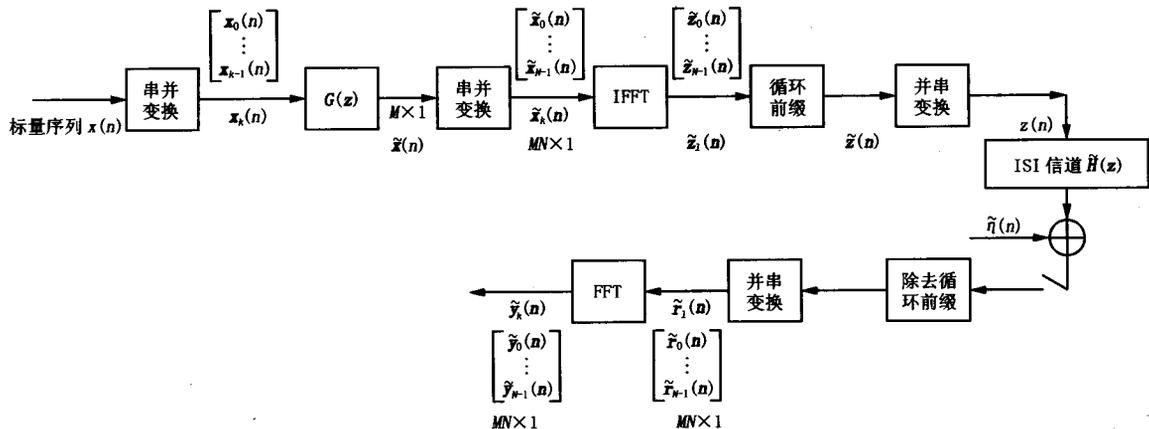


图 3 预编码 OFDM 系统

Fig 3 Precode OFDM system

能, 通常采用级联的维特比译码和带交织的 RS 前向纠错编码。然而, 由式 (1) 中的 PLC 传输函数, 我们可以看出这种多径 ISI 信道可能存在频谱零点。在这些有频谱零点的频段, 不可能恢复出信号的正交性, 从而降低了 OFDM 系统的性能, 且误码率随着频谱零点数目的增加而增加。为了克服频谱零点的影响, 介绍了一种新的解决方案——预编码 OFDM 技术。

2.2 预编码 OFDM 系统的描述

预编码 OFDM 技术的基本思想就是在相邻 K 个连续信息符号集中插入一个或多个零点, 它有如下优点:

- 1) 消除了 ISI 信道的频谱零点。
- 2) 预编码 OFDM 系统的实现比编码 OFDM 系统简单, 尤其当采用维特比译码时。
- 3) 预编码 OFDM 系统的误码率性能比传统的编码 OFDM 系统要好。
- 4) 降低了循环前缀的数据率。

在提出的预编码方案中, 标量信息都转化为了向量序列, 如图 3 所示。

信息序列 $x(n)$ 被分成了 $K \times 1$ 的向量序列: $\bar{x}(n) = (x_0(n), x_1(n), \dots, x_{K-1}(n))^T$, 其中 T 表示转置, $x_k(n) = x(Kn+k)$, $k=0, 1, \dots, K-1$ 。符号 $G(z)$ 是一个预编码因子, 且是 $M \times K$ 的多项式矩阵。假如 $\tilde{x}(n)$ 表示 $M \times 1$ 的预编码向量序列, $K \times 1$ 的多项式序列 $\bar{X}(z)$ 和 $M \times 1$ 的多项式序列 $\tilde{X}(z)$ 分别表示向量序列 $\bar{x}(n)$ 和 $\tilde{x}(n)$ 的传输函数 z , 则:

$$\tilde{X}(z) = G(z) \bar{X}(z) \quad (4)$$

预编码 $M \times 1$ 向量序列 $\tilde{x}(n)$ 又被分成 $MN \times 1$ 的向量序列:

$$\hat{x}(n) = (\hat{x}_0^T(n), \hat{x}_1^T(n), \dots, \hat{x}_{N-1}^T(n))^T$$

其中: 每个 $\tilde{x}_k(n) = \tilde{x}(Nn+k)$ 已是一个 $M \times 1$ 的向量, $k=0, 1, \dots, N-1$ 。让 $\tilde{z}_l(n), l=0, 1, \dots, N-1$ 作为 $\tilde{x}_k(n), k=0, 1, \dots, N-1$ 的 N 点 IFFT 输出, 则

$$\tilde{z}_l(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{x}_k(n) \exp(j2\pi kl/N),$$

$$l=0, 1, \dots, N-1 \quad (5)$$

向量序列 $\hat{z}(n)$ 经过串并变换成为预编码 OFDM 系统中发送的标量序列 $z(n)$ 。同时这里是假设图 2 中的预编码 OFDM 系统是单输入单输出 (SISO) 的系统。 $r(n)$ 是接收端接收的标量序列, 能转化为下列 $MN \times 1$ 的向量序列 $\hat{r}(n) = (\hat{r}_0^T(n), \hat{r}_1^T(n), \dots, \hat{r}_{N-1}^T(n))^T$, 其中每个 $\tilde{r}_l(n)$ 是 $M \times 1$ 的序列, $\hat{r}(n)$ 输出的 N 点 FFT 为:

$$\tilde{y}_k(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=0}^{N-1} \tilde{r}_l(n) \exp(-j2\pi lk/N),$$

$$k=0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

同式 (5) 中 N 点的 IFFT 类似, 每个 $\tilde{y}_k(n)$ 也是一个 $M \times 1$ 的向量。

$H(z)$ 经过大小为 M 的分组变换, 得到 $M \times M$ 的矩阵 $\tilde{H}(z)$, 由文献 [3] 可知:

$$\tilde{H}(z) = \begin{bmatrix} h_0(z) & z^{-1}h_{M-1}(z) & \dots & z^{-1}h_1(z) \\ h_1(z) & h_0(z) & \dots & z^{-1}h_2(z) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M-1}(z) & h_{M-2}(z) & \dots & h_0(z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $h_k(z)$ 是 $H(z)$ 的第 k 路多相分量。即 $h_k(z) = \sum_l h(Ml+k)z^{-l}, k=0, 1, \dots, M-1$ 。如果 $H(z)$ 的级数为 L , 那么当分组大小为 M 时 $\tilde{H}(z)$ 的级数 \tilde{L} 满足以下关系: $\tilde{L} = \lceil \frac{L}{M} \rceil$, 其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

同式 (2) 类似, 不难推出 $\tilde{y}_k(n)$ 和 $\tilde{x}_k(n)$ 之间的关系满足下式:

$$\tilde{y}_k(n) = \tilde{H}_k \tilde{x}_k(n) + \tilde{n}_k(n), \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (8)$$

其中: \tilde{H}_k 是 $M \times 1$ 的向量序列且 $\tilde{H}_k = \tilde{H}(z)|_{z=\exp(j2\pi \frac{k}{N})}$, $\tilde{n}_k(n)$ 是噪声 $\tilde{n}(n)$ 的 FFT, 与 $\tilde{n}(n)$ 有着相同的统计特性。

3 误比特 (BER) 性能分析

为了分析系统的误比特性能, 必须考虑下面的预编码矩阵:

$$G(Z) = \begin{bmatrix} I_{K \times K} \\ 0_{(M-K) \times K} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中: $M > K$, $I_{K \times K}$ 是 $(K \times K)$ 的恒等矩阵; $0_{(M-K) \times K}$ 表示 $(M-K) \times K$ 的全零矩阵。这种预编码允许在相邻的 K 个连续信息符号集之间插入 $(M-K)$ 个零点, 只要 $H(z)$ 的 M 个旋转间隔相等的零点互不相交, 它就能把一个有频谱零点的信道变成一个没有频谱零点的信道。

下面就以一个简单的例子分析预编码 OFDM 系统的误比特性能。假如 ISI 信道是 $H(z) = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$(1+z^{-1})$, 考虑 4 个子载波, 即 $N=4$, 预编码速率为 $1/2$, 即 $K=1, M=2$ 。由此可知, 预编码在两个相邻的信息符号中插入一个零, 由式 (7) 得, 分块的

ISI 信道为: $H(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & z^{-1} \\ \sqrt{2} & 1 \end{bmatrix}$, 其中分块大小为 2。

在传统的 OFDM 系统中, 输入输出关系为:

$$y_k(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} (1 + \exp(-j2\pi \frac{k}{4})) x_k(n) + n_k(n),$$

$$k=0, 1, 2, 3 \quad (10)$$

其中: $H_k = (1 + \exp(-j2\pi k/4)) / \sqrt{2}$ 即 $H_0 = \sqrt{2}$,

$H_1 = 1 - j/\sqrt{2}$, $H_2 = 0$, $H_3 = 1 + j/\sqrt{2}$ 。由此我们可看出第 3 个子载波信道完全失效了。传统 OFDM 系统的 BER 性能为:

$$P_e = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8} \quad (11)$$

对于预编码 OFDM 系统, 输入输出关系为:

$$\tilde{y}_k(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \tilde{x}_k(n) + \tilde{n}_k(n),$$

$$k=0, 1, 2, 3 \quad (12)$$

其中: $\tilde{H}_k = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}$, $k=0, 1, 2, 3$ 。由于有相同的奇异值 1, 式 (12) 可重新表示如下:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \tilde{y}_k(n) = x_k(n) + \tilde{n}_k(n). \quad (13)$$

其中: $\tilde{n}_k(n)$ 是复高斯随机变量, 同 $\tilde{n}(n)$ 有着相同的统计特性。当采用 BPSK 调制时, BER 是:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (14)$$

如果考虑附加的循环前缀,式(14)的 E_b/N_0 可由式 $\frac{NE_b}{(N+\tilde{N})N_0} = \frac{4E_b}{5N_0}$ 代替。显然,从式(11)和式(14)可看出,预编码 OFDM 系统的 BER 性能比传统的 OFDM 系统好很多。其中的一个关键因素就是预编码 OFDM 系统消除了频谱零点,而频谱零点则会大大地降低 OFDM 的系统性能。

为了分析系统的一般情况,我们仿真了预编码 OFDM 和采用卷积码 OFDM 的误比特性能,结果如图 4 所示。

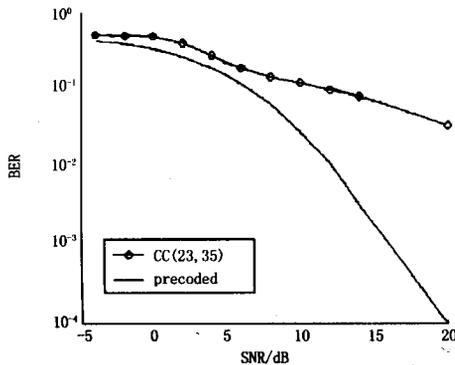


图 4 采用预编码 OFDM 和卷积码 OFDM 的 BER 性能比较

Fig 4 Comparison of BER performances for precoded OFDM and normal OFDM with convolutional coding

4 结论

本文介绍了一种在电力线网络中进行高速数据通信的预编码 OFDM 方法。这种新的方法包括简单地在相邻 K 个连续信息符号集中插入一个或多个

零点来消除 ISI 信道的频谱零点问题。首先,分析了时变信道传输函数特性。通过实验测量了已知的 PLC 信道响应,得出频谱零点用传统的编码方法不能克服。于是,对简单的预编码方案的研究允许在接收端定义一个判定准则,恢复出正交信息。通过仿真证明,与编码的 OFDM 相比这种方法减少了系统的复杂度,提高了系统的误比特性能。

参考文献:

- [1] Fethi T, Fatma R. Precode OFDM for Power Line Broadband Communication [A]. IEEE Proceeding of 50th AFCS 2003.
- [2] Zimmermann M. A Multi-path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range [A]. Proceeding of the Third International Symposium on the Power-line Communication and Its Application (IS-PLC). 1999.
- [3] Xia X. Precode and Vector OFDM Robust to Channel Spectral Nulls and with Reduced Cyclic Prefix Length in Single Transmit Antenna Systems [J]. IEEE, 2001, 49.
- [4] Xia X G. New Precoding for Intersymbol Interference Cancellation Using NonMaximally Decimated Multirate Filterbanks with Ideal FR Equalizers [J]. IEEE, 1997, 45: 2431-2441.

收稿日期: 2004-08-19; 修回日期: 2004-09-13

作者简介:

孟玉洁 (1979 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为为通信与信息系统; E-mail: meng_yujie@126.com

郝颖 (1981 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为为通信与信息系统;

贾怀义 (1948 -), 男, 研究员, 研究方向是个人通信、无线通信。

Precode OFDM for power line communication

MENG Yu-jie, XI Ying, JIA Huai-yi

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A channel model based on multi-path propagation is introduced, and the influence of spectral nulls to OFDM system caused by multi-path propagation is analyzed. However, conventional coding schemes fail in resolving this problem. In order to resolve this problem, a precode OFDM system is introduced, which improves the power line channel with spectral nulls. The BER performances of precode OFDM and normal OFDM with convolutional coding by actual case and simulation are compared.

Key words: power line communication; convolutional coding; precode OFDM; spectral nulls