

基于正交频分复用的低压电力线载波通信技术

张协衍, 章 兢, 王 玲, 廖洪运

湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要 电力线信道的复杂性使得其通信质量难以提高, 正交频分复用 (OFDM) 技术可提高抗多径干扰能力, 使电力线通信质量有望得到提高。本文分析了电力线信道的基本特性, 建立了一个反映信道特征的近似模型, 在已有的研究基础上提出了一种改进的子信道利用方法来实现 OFDM 技术在电力线载波通信中的应用; 通过建立 Matlab 仿真模型, 实现了基于改进方法的电力线载波通信仿真; 结果表明, 在电力线信道条件比较恶劣、数据传输误码率较高的情况下, 依据改进方法传输数据较为可靠。

关键词 电力线载波通信; 多径衰落; 正交频分复用; 离散傅里叶变换

中图分类号 TN913.6

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)12-0085-04

Communication Technology of Low Voltage Power Line Carrier Based on OFDM

ZHANG Xieyan, ZHANG Jing, WANG Ling, LIAO Hongyun

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract The complexity of power line channel makes the task of improving communication quality difficult. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) could make a full use of frequency bandwidth and improve the capability of anti-multi-path fading and it can be implemented by Discrete Fourier Transform (DFT) by using DSP in practice. So the quality of power line communication could be improved. Characteristics of power line channel such as impedance, fading and disturbance are analyzed. These characteristics are related with considerable time-variant and frequency attenuation of signals. A simple model of low voltage power line channel is established in this paper to reflect the characteristics of power line channel approximately. An improved method is proposed in order to apply OFDM to power line carrier communication, with N subcarriers in each OFDM symbol to transfer N same codes. Theoretically, in the receiver, N codes demodulated from each OFDM symbol are the same but the error code could be induced by various disturbances. So a special operation is used in the receiver for finding the right code. The reliability of the communication is increased by sacrificing the speed, as has been simulated by establishing a Matlab model. It is indicated by the simulation result that reliable data transfers can be achieved for a bad power line channel with high error code rate. The problem of this method while being implemented on a project will be discussed in future.

Keywords power line carrier communication; multi-path fading; orthogonal frequency division multiplexing; discrete Fourier transform

0 引言

电力线通信技术是指利用已有的配电网作为传输媒质, 实现数据传输和信息交换的一种技术。利用中、高压输电网电力线作为通信介质进行数据和语音的传输已经有几十年

历史, 现在的电力线通信技术是指在 220V/380V 的低压配电网实现高速率数据、语音传输的技术。电力网是覆盖面最广的网络, 利用已有的网络布局可以省去大量的通信网络建设费用, 其独特优点使之可以广泛应用于负荷管理、远程抄

收稿日期: 2010-03-30

作者简介: 张协衍, 博士研究生, 研究方向为现代通信网络、计算机控制, 电子信箱: zhangxieyan717@hotmail.com; 章兢 (通信作者), 教授, 研究方向为复杂计算机控制系统, 电子信箱: zhangj@hnu.com

表、家庭自动化以及宽带接入 Internet 等方面。电力线通信技术充分利用现有的配电网络基础设施,节省了巨大的新增投资,实现了高速率传输、方便地连接网络。因此,对电力线通信技术的研究具有深远意义^[1]。

1 电力线信道分析

低压配电网是富含各种噪声的网络,对传输信号具有较高程度的时变特性。此外,由于阻抗不匹配,在传输过程中,信号在网络节点上的反射和折射还会产生多径效应,从而造成频率选择性衰落。影响通信质量的主要原因为噪声干扰、输入阻抗不匹配、传输衰减大。

电力线信道中的噪声分布可分为有色背景噪声、窄带噪声、同步于工频的周期脉冲噪声、异步于工频的周期脉冲噪声和异步非周期脉冲噪声(随机噪声),主要为窄带噪声和脉冲噪声。

低压电力线的输入阻抗是信号发送接收装置驱动点上电力网的等效阻抗,它直接影响信号的耦合效率,是低压电力线传输特性的重要参数。低压电力线的阻抗主要由电力线路和接入负载决定,接入负载的不确定性引起电力线阻抗的不稳定,给通信模块的阻抗匹配设计带来困难。

电力线分支多、不同分支的电缆物理特性不一致,以及负载阻抗不恒定等特点使电力线信道成为一个多径反射、频率选择性衰落信道^[1]。

电力线信道的复杂性致使建立一个通用的精确模型模拟所有的低压配电网信道是不现实的,但建立一个反映信道基本特征的近似模型是可能的。现提出一个简单的电力线通信信道模型,如图 1 所示,其中,电力线多径衰落信道选用经典的四径信道模型,编写 M 函数实现传递函数 $h(f, t)$,噪声数据通过对噪声模型仿真波形的采样获取,具有很强的随机性^[2]。

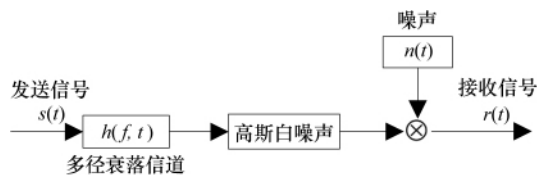


Fig. 1 Simple model of power line communication channel

2 电力线通信关键技术

传统的低压电力线载波通信一般采用窄带传输方式,最大弱点是抗噪声能力不强,使通信无法可靠进行。20 世纪 50 年代,扩频通信技术因其良好的抗干扰能力引起了人们的广泛关注。随着信息技术的快速发展,扩频技术在低压电力线载波通信中的应用也得到了深入研究,其本质是通过牺牲带宽来降低对信噪比的要求,这对频带资源十分不利,传输速率也难以提高。20 世纪 70 年代,美国学者 Weinstein 提出了基于离散傅里叶变换(DFT)的正交频分复用(Orthogonal Frequency

Division Multiplexing, OFDM) 技术的数据传输方式,该技术有望解决电力线通信中的诸多问题^[3-4]。

OFDM 是一种多载波调制技术,将高速率的串行数据流转换为若干路低速率的并行数据流,用低速率数据去调制相应的子载波,然后构成多路叠加并行传输的信号。将信号分解为 N 个子信号,再用 N 个子信号分别调制 N 个相互正交的子载波,码元周期被延长了 N 倍,从而提高了抗多径干扰能力。虽然单个子载波上信号的传输速率并不高,但所有的子信道合在一起可以获得很高的传输速率。

一个 OFDM 符号之内包含多个经过相移键控(PSK)或者正交幅度调制(QAM)的子载波。从 OFDM 起始时间 t_s 开始的 OFDM 符号可表示为^[5]

$$\begin{cases} s(t) = \text{Re} \left(\sum_{n=0}^{N-1} d_n \text{rect}(t - t_s - T/2) \exp[i2\pi f_n(t - t_s)] \right) & t_s \leq t \leq t_s + T \\ s(t) = 0 & t < t_s \text{ 或 } t > T + t_s \end{cases} \quad (1)$$

其中, N 为子载波的个数, T 为 OFDM 符号的周期, d_n ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) 为分配给每个子信道的数据符号, f_n 为第 n 个子载波的载波频率, 矩形函数 $\text{rect}(t) = 1$ ($-T/2 \leq t \leq T/2$)。

一旦将要传输的比特分配到各个子载波上,某一种调制模式将它们映射为子载波的幅度和相位,通常采用等效基带信号描述 OFDM 的输出信号。

$$\begin{cases} s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d_n \text{rect}(t - t_s - T/2) \exp[i2\pi f_n(t - t_s)] & t_s \leq t \leq t_s + T \\ s(t) = 0 & t < t_s \text{ 或 } t > T + t_s \end{cases} \quad (2)$$

其中, $s(t)$ 的实部和虚部分别对应 OFDM 符号的同相(In-phase)和正交(Quadrature-phase)分量,在实际系统中可以分别与相应子载波的 $\cos$ 分量和 $\sin$ 分量相乘,构成最终的子信道信号和合成的 OFDM 符号,系统基本模型框图如图 2 所示。

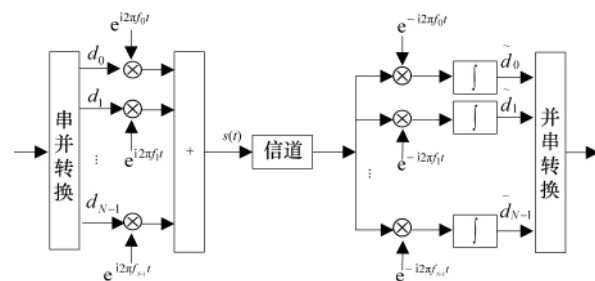


Fig. 2 Block of OFDM system

3 改进应用

电力线信道条件比较恶劣,OFDM 技术正是利用正交子载波的频谱特性来改善通信质量。本文采用改进的子信道利用方法实现 OFDM 技术在电力线载波通信中的应用。改进的

子信道利用方法如图 3 所示,其中, N 路子信道上的分配码元序列为 $d(n)(n=0, 1, 2, \dots, N-1)$, N 为子载波个数, f_n 为第 n 个子载波的载波频率, T 为 OFDM 符号的周期;待传输的电能量数据码元序列为 $a(j)(j=0, 1, 2, \dots, M-1)$, 每个 OFDM 符号里 N 路子信道上传输同一个电能量数据,即 $d(0)=d(1)=d(2)=\dots=d(N-1)=a(j)(j=0, 1, 2, \dots, M-1)$ 。通过降低传输速率提高通信的可靠性, M 个电能量数据需要 M 个 OFDM 符号进行传

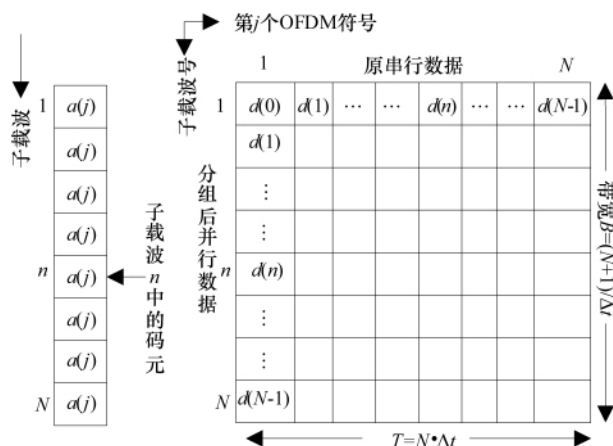


图 3 改进的子信道利用方式

Fig. 3 Improved method on using sub-channel

输, 每个 OFDM 符号里的 N 个子载波传输 N 个相同的码元数据, 即使信道条件十分恶劣, 也可以在接收端通过相应的方法获得准确的结果。

理论上, 从接收端的每个 OFDM 符号中解调出来的 N 个子信号应相同, 但电力线信道上的各种干扰会引起误码。需要在接收端解调得到的信号序列 $d(0), d(1), d(2), \dots, d(N-1)$ 中, 将 $d(0)$ 与剩下的码元依次做异或运算, 并记录 $N-1$ 次运算中结果为 1 的次数。同样对 $d(1), d(2), \dots, d(N-1)$ 进行相同的处理, 选取运算结果为 1 的次数最少的那个码元作为与原信号 $a(j)$ 最相符的数据, 在 M 个 OFDM 符号解调后得到传输的电能量数据序列 $a(0), a(1), a(2), \dots, a(M-1)$ 。

4 建模仿真和结果分析

20 世纪 60 年代 OFDM 的思想被提出, 20 世纪 70 年代, S. B. Weinstein 提出离散傅里叶变换实现多载波调制为 OFDM 的实用化奠定了理论基础^[3]。建立基于 OFDM 改进子信道方法的电力线载波通信系统模型(图 4), 发送端将被传输的数字信号转换成子载波幅度和相位的映射, 并进行离散傅里叶反变换(IDFT), 将数据的频谱表达式变到时域上; 接收端将射频信号与基带信号进行混频处理, 并用离散傅里叶变换分解成频域信号, 子载波的幅度和相位被解调出来并转换成数字信号。

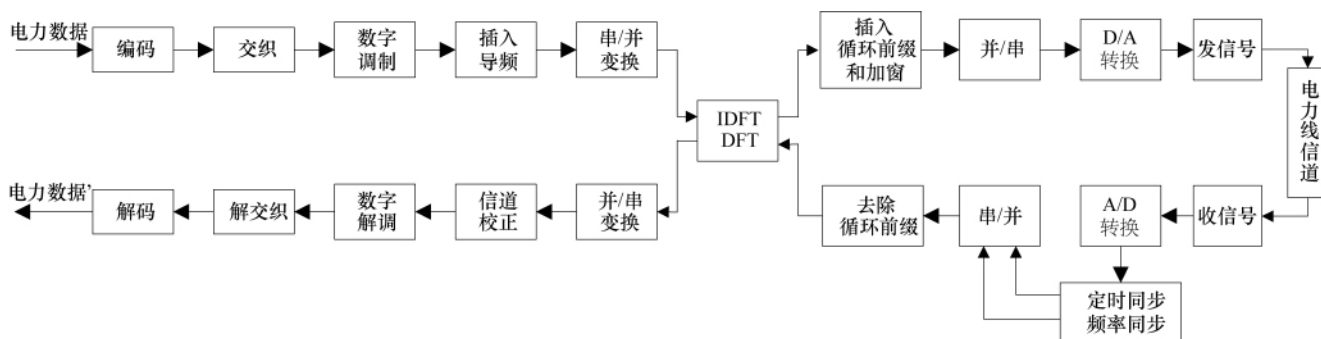


图 4 电力线载波通信系统模型

Fig. 4 Model of power line carrier communication system

电力线信道由图 1 中的简单电力线通信信道模型模拟, 包括多径衰落、高斯白噪声信道以及加性噪声。整个仿真模型通过编写 Matlab M 文件实现。仿真参数取: 低压电力线频带带宽 500kHz~3MHz(带宽 $B=2.5\text{MHz}$), 最大多径时延、保护间隔、OFDM 符号周期分别为 $2.5, 5, 25\mu\text{s}$, 相邻子载波间隔为 40kHz, 子信道数目、IFFT 点数、电力线数据码元数分别为 63、256、8, 总的符号速率为 2.1Mbps, 循环前缀长度为 $T_{\text{IFFT}}/5$, 调制方式为 16QAM。

文献 [6] 测得的低压电力线上的最大多径时延为 $1.6\sim 2.5\mu\text{s}$, 保护间隔的时间长度为时延扩展均方根的 2~4 倍, 因此选择保护时间间隔 $\Delta t=5\mu\text{s}$ 可消除低压电力线上的多径干扰。确定了保护间隔就可以确定 OFDM 符号周期的长度, 在

实际应用中一般选择符号周期长度是保护间隔长度的 5 倍, 所以取 OFDM 符号周期 $T=25\mu\text{s}$ 。这里假设信道在 500kHz~3MHz 的频带上, 相邻子载波间隔 $\Delta f=1/T=40\text{kHz}$, 因此子载波数目设置为 63。

仿真程序中设置电力线码元数据 $M=8$, 数字调制方式选择 16QAM, 因此每个码元携带 4bit 数据。根据前面提出的改进方法, 将 8 个码元组帧后形成待调制的二进制比特流; 通过 16QAM 调制后映射为子载波的幅度和相位; 调用 IFFT 函数对每个 OFDM 符号实现 OFDM 调制; 添加循环前缀升余弦加窗函数后就可以进行串并转换, 形成时域发送波形。在接收端将经过电力线传输函数的数据做相应的解调处理, 即可得到恢复的数据。仿真波形如图 5 所示, 图 5(a) 为添加循环

前缀、并串转换后的 OFDM 发送信号的波形,图 5(b)为经过电力线信道的接收信号的波形。

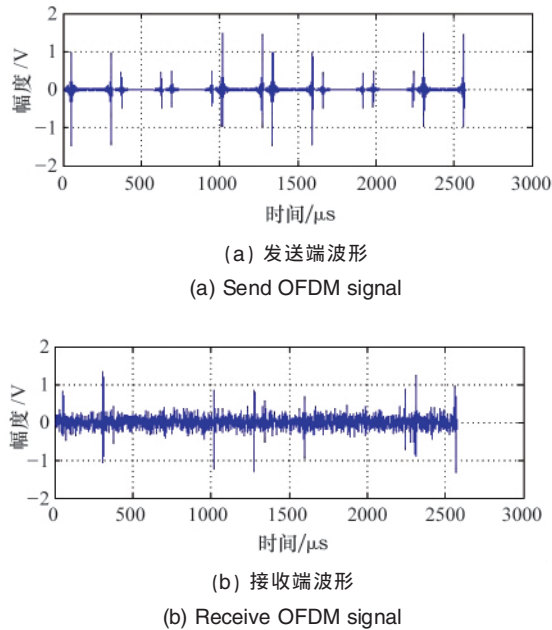


图 5 OFDM 信号发送和接收波形

Fig. 5 Send and receive OFDM signal

图 6 为误码率曲线,模拟电力线信道环境下仿真所得误码率较高;信噪比为 0dB 时,误码率为 0.3065;信噪比为 20dB 时,误码率为 0.0243。

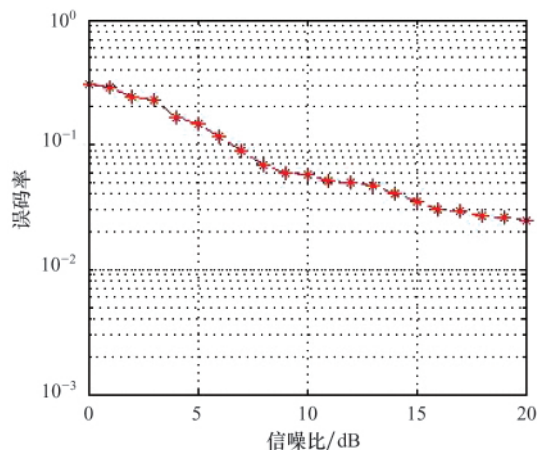


图 6 电力线信道模型下的 16QAM 调制方式的误码率曲线

Fig. 6 Error code rate on 16QAM modulation
in power line channel

改进的子信道利用方法是通过 63 个子载波传输同一个码元数据,即 8 个电力线数据码元通过 8 个 OFDM 符号实现传输,在每个码元受到较大干扰时,接收端还能通过相应的方式从 63 个子载波中提取较准确的码元数据,这种方式是以降低符号速率实现的。

接收端通过改进方法中提出的解帧方法可以较准确地

得到发送端所传输的数据。从每个 OFDM 符号中提取的码元结果可以看出,即使在信噪比很低、误码率很高的情况下,仿真所传输的 8 个电力数据码元还能够正确接收。例如在信噪比为 5dB、误码率为 0.1567 时,每个 OFDM 符号中 63 个子载波的正确率如表 1 所示。

表 1 OFDM 符号子载波正确率

Table 1 Sub-carrier wave correct rate of OFDM symbol

接收码元	子载波正确率	接收码元	子载波正确率
r_0	46/63	r_4	34/63
r_1	40/63	r_5	33/63
r_2	36/63	r_6	39/63
r_3	44/63	r_7	39/63

5 结论

低压电力线是一个十分复杂、随机性很强的信道,鉴于其独特的优点,针对电力线通信的研究具有深远的意义。本文提出的改进方法在 Matlab 仿真平台上得到了验证,模拟电力线信道上通信受到了较强的干扰,信噪比低、误码率高,但在接收端根据相应的解帧方法可以从子载波中获得较准确的数据。今后需要进一步深入研究该方法的具体实现,并讨论其在实际应用中的问题。

参考文献 (References)

- [1] 张有兵. 低压电力线多载波通信系统及相关技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院, 2005.
Zhang Youbin. Study on low-voltage powerline based multicarrier communication system and technology [D]. Wuhan: College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, 2005.
- [2] Onunga J O, Donaldson R W. Personal computer communications on intrabuilding power line LAN's using CSMA with priority acknowledgments[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989, 7(2): 180-191.
- [3] Weinstein S B, Ebert P M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 1971, COM-19(5): 628-634.
- [4] 刘鲲. OFDM 电力线载波远程智能抄表技术 [J]. *电力系统通信*, 2009, 30(204): 9-13.
Liu Kun. *Electric Power System Communication*, 2009, 30(204): 9-13.
- [5] 王文博, 郑侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
Wang Wenbo, Zhen Kan. *Broadband wireless communication OFDM technology*[M]. 2nd ed. Beijing: Post & Telecom Press, 2007.
- [6] Philips H. Development of a statistical model for powerline communication channels[DB/OL]. 2000. http://www.isplc.org/docsearch/Proceedings/2000/pdf/0615_001.pdf.

(责任编辑 刘志远)