

文章编号:1000-582X(2006)11-0085-04

# 低压电网基于发射效率的 OFDM 比特分配算法\*

刘晓明<sup>1</sup>, 尹康<sup>1,2</sup>, 王兴存<sup>2</sup>, 徐溢<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030; 2. 北京电力公司 调度通信中心, 北京 100031;

3. 北京诚信电力公司, 北京 100036)

**摘要:** 低压电网信道衰减特性变化剧烈, 正交频分复用(OFDM)系统的自适应调制技术根据每个子载波的信道状况和用户需求, 为每个用户分配最佳的子载波, 为每个子载波分配最佳的调制方式, 这样可以更好地利用信道资源, 提高传输速率. 以低压电网为对象, 利用多项式函数拟合的低压电网信道模型, 从基于 SNR 门限的比特分配算法出发, 提出了一种基于发射效率的 OFDM 比特分配算法, 并与固定调制方式和固定功率分配的 OFDM 系统进行对比. 结果表明该算法能够根据各个子信道的实际传输情况灵活地分配发送功率和信息比特, 使更多的子载波可以使用性能好的调制方式, 从而有效地利用了低压电网信道资源.

**关键词:** 低压电网; 电力线通信; 自适应 OFDM; 发射效率; 比特分配算法

**中图分类号:** TM73; TN914.5

**文献标识码:** A

为了克服电力线上固有的高噪声、多径效应和频率衰减等情况, 有效利用现有低压电力线实现高频数字通信, 目前普遍认可的是采用 OFDM 技术<sup>[1]</sup>. 目前的通信系统, 通常采用一种简单的调制方式外加复杂的纠错码<sup>[2]</sup>, 但是低压电网信道衰减特性变化剧烈, 快衰落的幅度变化在 0.2 ~ 2 dB, 慢衰落则可以达到 5 ~ 25 dB<sup>[3]</sup>, 在这种情况下, 如果使用单一的调制方式, 在信道条件优良时, 容易浪费发射功率; 而在信道条件恶劣时, 又容易引起信噪比不足, 影响正常传输. OFDM 系统的自适应调制技术可以根据信道特性选择相应的发射功率, 从而更好地利用信道资源, 提高传输速率. 国内对低压电网 OFDM 系统的自适应调制技术研究还很少. 笔者主要针对这一问题进行探讨.

以低压电网为对象, 提出了一种基于发射效率的 OFDM 比特分配算法, 并将其与固定调制方式和固定功率分配的 OFDM 系统进行对比, 讨论了自适应调制对传输速率的影响.

## 1 自适应 OFDM 系统的基本原理

### 1.1 自适应技术的理论基础

OFDM 系统把一个具有频率选择性衰落的宽带信

道分成若干个平坦的窄带子信道, 而这些子信道的信道响应有所不同. OFDM 系统根据实际信道特性灵活分配功率和调制方式, 如 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 等, 以达到对信道的最佳利用<sup>[4-6]</sup>. 众所周知, 能够在带限信道上实现理论信道容量的最佳输入功率分布应该满足注水分布<sup>[7]</sup>:

$$S_x(f) = \begin{cases} P - \frac{N(f)}{|H(f)|^2}, & f \in B \\ 0 & f \notin B \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $B$  为信道带宽;  $P$  为该带宽内的输入功率;  $H(f)$  为信道传递函数;  $N(f)$  为噪声功率谱密度. 式(1)充分说明了自适应 OFDM 系统要求各子信道上的功率分配遵循“优质信道多传输, 较差信道少传输, 劣质信道不传输”.

### 1.2 自适应 OFDM 系统结构

图 1 给出了自适应正交频分复用(OFDM)系统的结构图. 发送端首先需要获取各个子载波的信道状态信息, 方法是由接收端做信道估计, 并通过反馈信道通知发送端. 然后, 发送端根据一定的算法确定各个子载波分配的比特数(即调制方式), 并将数据比特进行相应的星座点映射, 再进行 IFFT 变换, 并串变换

\* 收稿日期: 2006-07-15

基金项目: 云南省省院省校科技合作计划项目(24031)

作者简介: 刘晓明(1963-), 男, 重庆人, 重庆大学教授, 博士后, 主要从事测控系统数字化、软化、智能化的研究.

(P/S),同时各子载波调制方式作为信令信息也同时发送.接收端先进行 OFDM 调制,串并变换(S/P)和 FFT,然后根据信道估计得到的信道状态信息和自适应调制的信令信息,对各子载波作相应的解调,得到数据比特,同时将信道估计的结果通过反馈信道送到发送端.

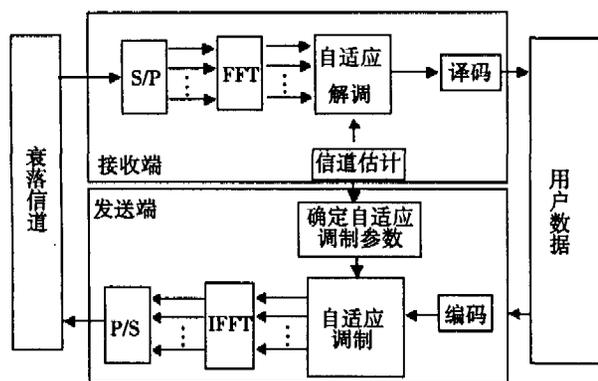


图1 自适应 OFDM 系统结构图

自适应 OFDM 系统的核心思想在于根据每个子载波的信道状况和用户需求,为每个用户分配最佳的子载波,为每个子载波分配最佳的调制方式,这样才能使资源得到最有效的利用.

## 2 低压电网信道模型

低压电网信道特性复杂、变化剧烈,能够负担的极限传输速率变化很大,如果使用固定调制方式的 OFDM 系统,造成信道资源利用率不高.笔者针对低压电网环境,主要考虑在发射功率和系统传输的差错概率一定的情况下,如何实现信息传输速率最大化.

根据公式(1),功率和调制方法的分配首先要取得信道的衰减函数  $H(f)$  和信道噪声的功率谱密度  $N(f)$ . 参照文献[8]的实测数据,建立了 500 kHz ~ 3 MHz 频率范围内的低压电网信道仿真平台,实际系统噪声用功率谱密度  $\sigma$  为常数(约 -112 dB · W/Hz)的带限白噪声叠加窄带干扰(频率为 0.6 MHz 和 1.25 MHz)来模拟,而系统的衰减特性则采用最好、正常和最差 3 种情况模拟.为了计算方便,笔者对 3 种情况下信道衰减特性进行了拟合,采用 10 阶多项式拟合,衰减函数拟合式如下:

$$20\log_{10} |H(f)| = \alpha_0 + \alpha_1 f^1 + \alpha_2 f^2 + \alpha_3 f^3 + \alpha_4 f^4 + \alpha_5 f^5 + \alpha_6 f^6 + \alpha_7 f^7 + \alpha_8 f^8 + \alpha_9 f^9 + \alpha_{10} f^{10} \text{ dB} \quad (2)$$

该拟合函数均方根误差在信道环境优良、正常和恶劣情况下分别为 3.08、5.60、4.27. 表 1 为 3 种情况下衰减函数多项式的参数.

表 1 衰减函数多项式参数

参数	信道优良	信道正常	信道恶劣
$a_0$	-1 718	-1 104	-3 635
$a_1$	13.37	7.274	28.14
$a_2$	$-4.487 \times 10^{-2}$	$-1.976 \times 10^{-2}$	$-9.397 \times 10^{-2}$
$a_3$	$8.444 \times 10^{-5}$	$2.705 \times 10^{-5}$	$1.765 \times 10^{-4}$
$a_4$	$-9.895 \times 10^{-8}$	$-1.808 \times 10^{-8}$	$-2.069 \times 10^{-7}$
$a_5$	$7.578 \times 10^{-11}$	$2.136 \times 10^{-12}$	$1.587 \times 10^{-10}$
$a_6$	$-3.860 \times 10^{-14}$	$5.463 \times 10^{-15}$	$-8.090 \times 10^{-14}$
$a_7$	$1.298 \times 10^{-17}$	$-4.203 \times 10^{-18}$	$2.718 \times 10^{-17}$
$a_8$	$-2.767 \times 10^{-21}$	$1.429 \times 10^{-21}$	$-5.781 \times 10^{-21}$
$a_9$	$3.394 \times 10^{-25}$	$-2.428 \times 10^{-25}$	$7.053 \times 10^{-25}$
$a_{10}$	$-1.821 \times 10^{-29}$	$1.676 \times 10^{-29}$	$-3.759 \times 10^{-29}$

## 3 自适应 OFDM 比特分配算法及其性能

下面从不同调制方式所需要的 SNR 门限出发,对自适应比特分配算法进行了讨论,并与固定子载波调制方式以及固定子载波功率的 OFDM 系统进行了比较.

### 3.1 自适应 OFDM 比特分配算法

自适应 OFDM 系统能够根据各个子信道的实际传输情况灵活地分配发送功率和信息比特,从而更加有效地利用信道资源,提高传输速率<sup>[2]</sup>. 基于 SNR 门限的比特分配算法<sup>[9-10]</sup>适用于子载波功率分配,它以不同调制方式的 SNR 门限为依据,进行自适应功率分配以达到较高的传输速率.该方法计算复杂度较低,因为不同调制方案所需的 SNR 门限是预知的,表 2 列出了不同调制方案选择的 SNR 门限.

表 2 不同调制方案的 SNR 门限

调制方案	SNR 门限/dB
不使用	<8
二进制相移键控(BPSK)	8
四相相移键控(QPSK)	10
16 点的正交幅度调制(16QAM)	18
64 点的正交幅度调制(64QAM)	24

说明:给定比特误码率(BER)为  $10^{-3}$ .

在发射功率和系统传输的差错概率一定的情况下,笔者提出了一种基于发射效率的子载波功率分配算法,算法描述如下:

令发射总功率为  $P_m$ ,子带  $i$  的发射功率为  $p_{i,j}$ ,  $j$

表示调制方式(取 BPSK、QPSK、16QAM、64QAM 等),  $\lambda_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{P_{in}}$  为子带发射功率系数,  $k_j = \log_2(M)$  为每个  $M$  进制调制符号上携带的信息比特的个数, 调制方式  $j$  的信噪比门限为  $e_j$ , 定义子带  $i$  的发射效率  $Q_i = \frac{k_j}{\lambda_{i,j}}$ .

在分配子带功率的时候, 子带  $i$  的发射功率必须高于调制方式  $j$  所需信噪比  $\lambda_{i,j} \times P_{in} \times \frac{|H|^2}{\sigma \times B} \geq e_j$ , 而

且子带发射功率系数总和  $\sum_{i=1}^{256} \lambda_{i,j} \leq 1$ , 在尽可能满足所有子载波调制发射且不浪费发射功率的基础上, 通过最优化算法寻求各子载波发射效率最大化, 程序具体步骤如图 2 所示.

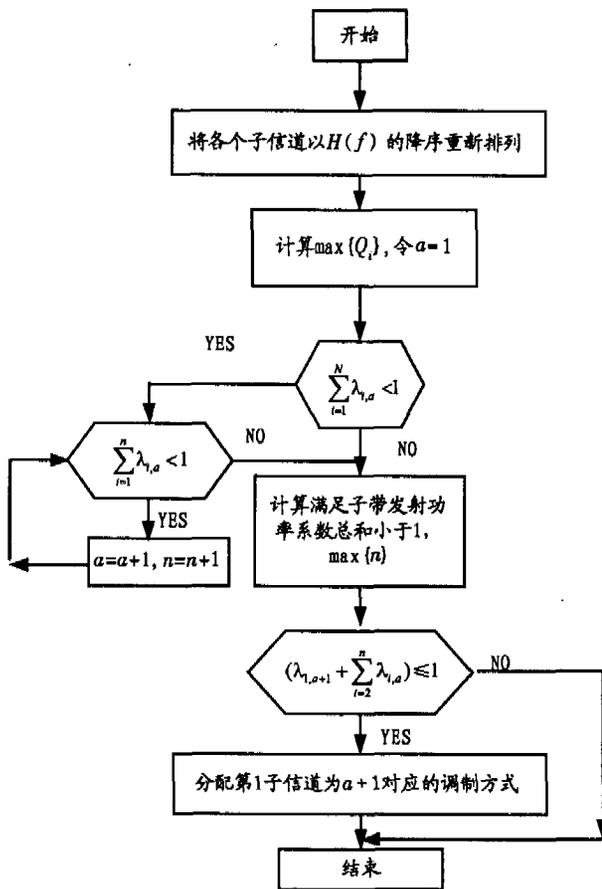


图 2 算法流程图

### 3.2 算法性能分析

若每个子载波带宽一定, 调制符号的速率  $r_d$  也就一定了, 则信息传输速率  $r_c = r_d \times k_j$  取决于每个调制符号所携带的比特数  $k_j$ , 即  $r_c$  的大小取决于调制方式的不同. OFDM 系统的每个子载波具有相同的调制符号速率, 因此多进制系统显然比二进制系统具有更高的信息传输速率<sup>[11]</sup>.

在保证系统传输的误码率为  $10^{-3}$  的情况下, 使用

图 1 所示的自适应 OFDM 模型, 并用前述的多项式拟合函数表示优良、正常、恶劣 3 种低压电力线信道模型, 对所提出的基于发射效率的比特分配算法进行了仿真研究, 图 3 中给出了相应的子载波发射功率系数  $\lambda_{i,j}$  和每个调制符号所携带的比特数  $k_j$  的计算结果.

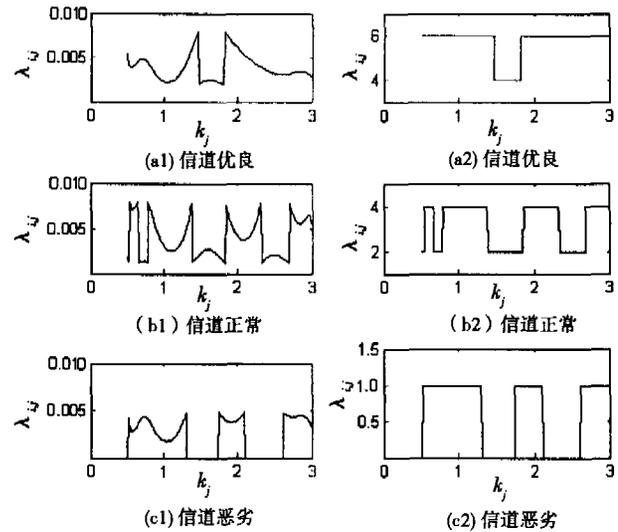


图 3 功率系数  $\lambda_{i,j}$  和  $k_j$

为了分析自适应 OFDM 系统采用比特分配算法对提高信息传输速率的影响, 通过计算在不同的信道特性低压电网环境中的子载波比特分配情况, 对比了提出基于发射效率的算法和固定调制 OFDM、固定功率 OFDM 的子载波调制分配方式, 如表 3 所示.

表 3 子载波调制方式对比表

信道	发射总功率 /W	子载波总数	调制方式	$k_j$	子载波个数		
					自适应 OFDM	固定调制 OFDM	固定功率 OFDM
优良	1	256	64QAM	6	220	0	166
			16QAM	4	36	256	90
正常	1	256	16QAM	4	156	0	113
			QPSK	2	100	256	143
恶劣	1	256	BPSK	1	227	206	206
			不使用	0	29	50	50

由表 3 可以看出:

1) 低压电网信道特性复杂, 变化剧烈. 笔者以自适应 OFDM 系统为例, 在信道优良的情况下低压电网可传输的速率高于正常情况 78%, 恶劣情况下可以传输信息速率的 6.5 倍. 根据低压电网信道特性变化剧烈这样特点, 采用根据信道实际情况调整发射功率和调制方式的自适应技术是非常适合的.

2) 在优良的情况下, 采用自适应 OFDM 系统的信息传输速率比固定调制 OFDM 高 43% 比固定调制功率 OFDM 高 8%. 正常情况下, 本算法的信息传输速

率比固定调制 OFDM 高 61% 比固定调制功率 OFDM 高 12%。恶劣情况下,本算法的信息传输速率比固定调制 OFDM 和固定调制功率 OFDM 都高 10.2%。由此可见自适应 OFDM 比现在使用的固定调制方式更适用于低压电网的高速传输,为电力线高速传输的发展提供了方向。

#### 4 结 论

低压电网信道特性复杂,变化剧烈,采用根据信道实际情况调整发射功率和调制方式的自适应技术是非常适合的。笔者以低压电网为对象,提出了一种基于发射效率的 OFDM 比特分配算法,并与固定调制方式和固定功率分配的 OFDM 系统进行对比,该算法能够根据各个子信道的实际传输情况灵活地分配发送功率和信息比特,使更多的子载波可以使用性能好的调制方式,更有效地利用信道资源,使其传输速率得到提高。

#### 参考文献:

- [1] 姚雪峰. OFDM 编码在宽带电力线通信中的应用及其改进[J]. 电力系统自动化,2004,28(18):71-75.
- [2] 尹长川. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004.
- [3] 刘海涛,张保会,谭伦农. 低压电网的窄带衰落特性研究[J]. 西安交通大学学报,2003,37(4):411-414.
- [4] CZYLWIK A. Adaptive OFDM for Wideband Radio Channels[A]. Proceeding IEEE GLOBECOM'96 [C]. London: IEEE, 1996. 713-718.
- [5] KELLER T, HANZO L. Adaptive Modulation Techniques for Du-plex OFDM Transmission [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(5): 1893-1906.
- [6] MOON J, PARK S Y, HONG S. Adaptive OFDM System for Multi-rate Multi-user Services in Wireless Communications [A]. The 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications Volume 3 [C]. Honolulu: IEEE, 2002. 1039-1043.
- [7] GALLAGER R G. Information Theory and Reliable Communications[M]. New York: John Wiley and Sons, 1968.
- [8] 张有兵,程时杰,熊兰. 基于低压电力线实测信道特性的 OFDM 分析和仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 7(11):16-33.
- [9] GRUNHEID R, ROHLING H. Adaptive Modulation and Multiple Access for the OFDM Transmission Technique[J]. Wireless Personal Comm, 2000, 13:5-13.
- [10] GRUNHEID R, BOLINTH E, ROHLING H. A Blockwise Loading Algorithm for the Adaptive Modulation Technique in OFDM Systems[J]. IEEE Vehicular Technology Conference, 2001, 2:948-951.
- [11] 樊昌信. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

## Bit Allocation Algorithm for Low Voltage Network OFDM Systems Based Transmitted Efficiency

LIU Xiao-ming<sup>1</sup>, YIN Kang<sup>1,2</sup>, WANG Xing-cun<sup>2</sup>, XU Mi<sup>3</sup>

( 1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
2. Dispatching Communication Center, Beijing Electric Power Corporation, Beijing 100031, China;  
3. Beijing Supply Belive Service Corporation, Beijing 100036, China)

**Abstract:** Selfadaptation OFDM is suitable for the low voltage network. To satisfy the request of high speed communication in low voltage network, this paper studies a bit allocation algorithm for low voltage network OFDM systems based transmitted efficiency. And compared with the fix modulate OFDM and fix power OFDM, this algorithm can allocate the power and modulate flexibly and increase the speed. It is very appropriate for the low voltage network application.

**Key words:** low voltage network; power line communication; selfadaptation OFDM; transmitted efficiency; bit allocation algorithm

(编辑 李胜春)