

# 单用户电力线通信自适应 OFDM 系统的资源分配

方拥军<sup>1</sup>, 徐志强<sup>2</sup>, 翟明岳<sup>2</sup>

(1. 南华大学资产管理处, 湖南 衡阳 421001; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 分析了电力线通信自适应 OFDM 系统在每 OFDM 符号内的总比特数、各子载波上的最大功率和比特数约束下, 单用户在多子载波上功率自适应的资源分配模型, 探讨了其发射总功率最小的最优分配准则, 提出了一种基于最优分配准则的单用户功率自适应的资源分配和调整算法, 其组成可分为资源预分配、约束调整和交换调整。在典型电力线环境下仿真结果表明, 所提算法性能与改进的位添加查表算法性能相当, 接近位添加法; 而其运算复杂度低于改进的位添加查表算法, 远小于位添加法。

**关键词:** 电力线通信; 自适应 OFDM; 最优分配准则; 资源调整; 位添加

## Resource allocation for single user in power line communication adaptive OFDM systems

FANG Yong-jun<sup>1</sup>, XU Zhi-qiang<sup>2</sup>, ZHAI Ming-yue<sup>2</sup>

(1. Department of Assets Administration, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The power adaptive resource allocation model for single user in multi-carriers is analyzed with the restrictions of total bits for each OFDM symbol and maximal power and bits for every sub-carrier in power line communication adaptive OFDM systems. The optimal allocation rule for minimal emission power is discussed and a power adaptive resource allocation and adjustment algorithm based on the optimal allocation rule for single user is proposed, which is composed of resource pre-allocation, restriction adjustment and swap adjustment. The algorithm is tested in typical power line channel environment and the simulation results indicate that it has almost the same performances as the reformative bit adding finding table algorithm and bit adding algorithm, but its implementation complexity is lower than the reformative bit adding finding table algorithm and largely lower than the bit adding algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60402004)and Ministry of Education of the People's Republic of China(No.105050).

**Key words:** power line communications; adaptive OFDM; optimal allocation rule; resource adjustment; bit loading

中图分类号: TM73; TN913 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0006-05

## 0 引言

电力线通信要发展必实现高速化, OFDM 技术是实现其高速通信最具竞争力的技术。但电力线信道的特性恶劣<sup>[1]</sup>, 如果使用传统的 OFDM 技术, 将难以保证系统服务质量。自适应 OFDM 根据子载波的载噪比, 动态地给每个子载波分配比特数和发射功率, 有效地降低了恶劣信道对系统性能的影响。因此自适应 OFDM 可以有效提高电力线通信系统的资源利用率和服务质量<sup>[2]</sup>。

自适应 OFDM 的一个关键部分是资源分配, 其

实质为子载波的比特和功率分配。研究人员针对不同的优化目标和约束条件提出了多种动态比特分配算法。文献[3]提出 MIMO-OFDM 系统下发射功率最小的自适应迭代比特分配算法, 性能逼近最优且大大降低计算复杂度; 文献[4]在无线 OFDM 系统传输速率和最大误码率下, 利用了注水原理和贪婪算法特点提出一种最小化发射功率的高效功率和比特分配算法, 其计算效率高。虽然已有很多文章研究资源分配, 但他们并不针对电力线通信系统, 而文献[2]针对室内电力线通信 OFDM 系统提出一种在多链路功率谱限制下的子载波和功率分配算法, 并在多种可变信道条件下仿真了算法的性能; 文献[5]提出了一种在功率谱限制条件下的比特分配算法, 在典型电力线环境下的仿真表明该算法适合于高速电

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60402004); 教育部重点资助项目(105050)

力线通信。

尽管文献[2,5]针对电力线通信系统,研究了在各种约束下资源分配和交换调整,但它们要么计算复杂度大,要么性能次优。本文针对电力线通信自适应 OFDM 系统的约束条件,分析了单用户功率自适应的比特和功率分配数学模型,探讨了其发射总功率最小的最优分配准则,提出了一种基于最优分配准则的单用户资源分配和调整算法,并在典型的电力线环境下进行了仿真。本文的工作是在文献[5,7]的基础上进一步完善,其中有些内容与文献[5,7]有所重复。

## 1 单用户下功率自适应资源分配模型

本文研究电力线通信自适应 OFDM 系统中单用户在其传输速率满足下系统发射的总功率最小,其优化目标如式(1)所示:

$$\min \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N r_i = R \quad (1)$$

其中:  $R$  为用户每符号要求传输的总比特数;  $r_i$  和  $\varepsilon_i$  分别是子载波  $i$  分配的比特数和发射功率。

为了提高电力线通信的电磁兼容能力,需要对其各子载波上发射的信号实行功率上限约束。

$$0 \leq \varepsilon_i \leq \bar{\varepsilon}_i, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

其中:  $\bar{\varepsilon}_i$  为子载波  $i$  最大许可的功率;  $N$  为系统的子载波数。为了降低系统复杂度,每个子载波分配的比特数为在一定范围之内的离散非负整数。

$$0 \leq r_i \leq \bar{r}, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

其中:  $\bar{r}$  为每个子载波允许分配的比特数上限。

根据信息论知识,  $r_i$  和  $\varepsilon_i$  之间满足下面的关系:

$$r_i = \log_2(1 + \varepsilon_i g_i / \Gamma) \quad (4)$$

其中:  $g_i$  为子载波  $i$  的单位功率载噪比,  $\Gamma$  表示载噪比差额。如果各子载波都采用 QAM 调制且误码率  $P_e$  一致,则其载噪比差额  $\Gamma$  可认为基本相等。

$$\Gamma \approx \frac{1}{3} [Q^{-1}(P_e/4)]^2 \quad (5)$$

其中:  $Q^{-1}()$  为错误概率函数逆函数。

根据式(1)~(4),可得到电力线通信自适应 OFDM 系统中单用户功率自适应资源分配模型为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N r_i = R \\ & \quad 0 \leq \varepsilon_i \leq \bar{\varepsilon}_i, \quad \forall i \\ & \quad 0 \leq r_i \leq \bar{r}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (6)$$

## 2 最优分配准则

根据式(4)可得到子载波  $i$  需要的发射功率  $\varepsilon_i(r_i)$  和分配的比特数  $r_i$  之间的关系为

$$\varepsilon_i(r_i) = \Gamma(2^{r_i} - 1) / g_i \quad (7)$$

从而,给予子载波  $i$  分配第  $r_i$  个比特所需增加功率为

$$\Delta \varepsilon_i(r_i) = \varepsilon_i(r_i) - \varepsilon_i(r_i - 1) = \Gamma 2^{r_i - 1} / g_i \quad (8)$$

如果在子载波  $i$  上加 1 比特是最优的,则其子载波的功率增量必然满足下面的条件:

$$\Delta \varepsilon_i(r_i + 1) \leq \Delta \varepsilon_j(r_j + 1), \quad \forall i, j = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式(9)表明当比特分配最优时,如果进行比特调整,减少的功率必然小于增加的功率,系统总发射功率只会增加。所以根据式(8)和式(9),动态比特分配完成之后,所有子载波的功率增量应该满足式(10)。

$$\Delta \varepsilon_i(r_i) < 2\Delta \varepsilon_j(r_j), \quad \forall i, j \quad (10)$$

根据式(10),通过全部子载波最大、最小功率增量的比值来判断分配的结果是否最优,即

$$\max_i \{\Delta \varepsilon_i(b_i)\} < 2 \min_i \{\Delta \varepsilon_i(b_i)\} \quad (11)$$

上面为最优分配准则<sup>[5]</sup>,根据其可以直接得到位添加法:根据式(8),首先求出所有子载波每添加一个比特时所需的功率增量  $\Delta \varepsilon_i(b_i + 1)$ ;再根据这些增量值选择具有最小功率增量的子载波分配一个比特,重复直到总比特数约束满足为止。该算法虽然能够得到最优分配结果,但是需要不断地对所有子载波的功率增量进行搜索,且每次搜索只能分配一个比特,其运算量大。为了减少其运算量和保持其性能,我们提出一种基于最优准则的功率自适应资源分配和调整算法。

## 3 最优准则分配和调整算法

文献[5]的速率自适应资源分配算法,没有考虑功率的最小化目标,但其将复杂的非线性优化问题根据不同的优化约束条件分解为三个求解阶段的思想非常好,于是本文也将其资源分配分解为三个相互联系阶段:首先不考虑每个子载波的最大功率和比特数约束,将问题转化为式(1)中的资源分配问题,此时仅根据子载波的载噪比分配比特和功率;然后根据约束条件来调整第一阶段的分配结果,对于剩余的比特,向那些有加载能力的子载波继续加配,且添加比特的子载波所采用的 QAM 阶数尽量小和载噪比尽量高;最后在上面比特分配的基础上进行子载波间的比特交换和功率调整,在分配的总

比特不变下尽量减少系统发射的总功率。

### 3.1 第一阶段分配

由拉格朗日乘法可知, 对每个子载波都有

$$\varepsilon_i + \Gamma/g_i = K, \quad \forall i \quad (12)$$

其中:  $K$  为注水常数。对于任意两个子载波  $i$  和  $j$ , 分配的比特数之差为  $\Delta r$ , 根据式(8)和式(10)可得

$$-1 < \log_2(g_j/g_i) - \Delta r < 1 \quad (13)$$

如果子载波  $i$  在全部子载波中载噪比最小, 且分配的比特数为零, 则子载波  $j$  分配的比特数  $r_j$  与归一化载噪比  $g'_j$  之间满足

$$\log_2(g'_j) - r_j \in (-1, 1) \quad (14)$$

其中: 
$$g'_j = g_j / \min_n \{g_n\} \quad (15)$$

因此可按各子载波的归一化载噪比来确定其分配的比特数<sup>[5]</sup>。因为子载波分配的比特数必须是整数, 根据式(14), 可以令每个子载波分配的比特数等于其归一化载噪比对数的向下取整, 即

$$b'_i = \lfloor \log_2(g'_i) \rfloor \quad (16)$$

由于载噪比最小的子载波的比特数  $b_i$  未必为零, 因此需要根据总比特数约束条件求解  $b_i$ 。设  $b_i = k$ , 则子载波上分配的比特数为

$$b_{li} = b'_i + k, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

进而求得“注水”常数为

$$K = \left\lfloor (R - \sum_{i=1}^N \lfloor \log_2(g'_i) \rfloor) / N \right\rfloor \quad (18)$$

如果  $b_{li}$  不大于 0, 说明该子载波不能参加比特分配, 在式(18)计算  $K$  值时去除。求  $b_{li}$  后再按式(7)计算各子载波  $i$  在第一阶段分配的功率  $\varepsilon_{1i}$ 。

### 3.2 第二阶段调整

先根据第一阶段分配的功率及相应的子载波功率上限, 得到各子载波  $i$  可能分配的功率为

$$\bar{P}_i = \min\{\bar{\varepsilon}_i, \varepsilon_{1i}\} \quad (19)$$

再根据式(4)和式(19), 求子载波  $i$  由可能分配的功率而得到的比特数为

$$\bar{b}_p = \lfloor \log_2(1 + \bar{P}_i g_i / \Gamma) \rfloor \quad (20)$$

结合式(3)得到各子载波  $i$  可能分配的比特数为

$$b'_{2i} = \min\{\bar{F}, b_{li}, \bar{b}_p\} \quad (21)$$

此时剩余未分配的总比特数为

$$R_{\text{res}} = R - \sum_{i=1}^N b'_{2i} \quad (22)$$

而仍有能力加分比特的子载波集  $M$  为

$$M = \{i \mid \delta_i = \bar{F} - b'_{2i} > 0\} \quad (23)$$

为减少算法的复杂性, 将子载波集  $M$  按  $\delta_i$  值分

组, 把未分配的总比特数向这些分组子载波按下准则加分, 即优先加分比特的子载波所采用的 QAM 调制阶数尽量小和信道载噪比尽量高<sup>[6]</sup>。

### 3.3 第三阶段交换

第二阶段的比特调整, 是在诸多约束条件下进行的, 其可使一些子载波的比特数发生变化。根据式(8)其功率增量也将发生变化, 可能出现

$$\max\{\Delta\varepsilon_i(b_i)\} > 2 \min\{\Delta\varepsilon_i(b_i)\} \quad (24)$$

此时可以通过在子载波之间比特交换和功率调整来满足最优分配准则, 但需要考虑子载波的限制情况, 需要选择合适的子载波来进行处理<sup>[7]</sup>。如式(24)成立, 且子载波  $i$  满足  $b_i \geq 1$  和子载波  $j$  满足  $b_j + 1 \leq \bar{r}$ ,  $\varepsilon_j + \Delta\varepsilon_j(b_j + 1) \leq \bar{\varepsilon}_j$ , 则在这两个子载波之间可以交换一个比特, 即

$$\begin{cases} b_i = b_i - 1, & i = \arg \max_k \{\Delta\varepsilon_k(b_k)\} \\ b_j = b_j + 1, & j = \arg \min_k \{\Delta\varepsilon_k(b_k)\} \end{cases} \quad (25)$$

同时调整子载波分配的功率和功率增量为

$$\begin{cases} \varepsilon_i(b_i) = \varepsilon_i(b_i) - \Delta\varepsilon_i(b_i) \\ \varepsilon_j(b_j) = \varepsilon_j(b_j) + \Delta\varepsilon_j(b_j) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \Delta\varepsilon_i(b_i) = \Delta\varepsilon_i(b_i) / 2 \\ \Delta\varepsilon_j(b_j) = 2\Delta\varepsilon_j(b_j) \end{cases} \quad (27)$$

综上所述, 最优准则分配和调整算法如下:

(1) 将子载波的单位功率载噪比  $g_i$  按从小到大顺序排列并重新标号, 记参加比特分配的子载波集为  $A = \{1, 2, \dots, N\}$ , 令  $l = 1$ , 根据式(18)和式(17)分别计算  $K^l$  和  $b'_{1l}$ 。

(2) 当  $b'_{1l}$  不大于 0 时, 子载波  $l$  不参加比特的分配, 更新  $A = A / \{l\}$  和  $l = l + 1$ , 重新计算  $K^l$  和  $b'_{1l}$ ,  $b'_{1l}$  再与 0 比较, 循环直到  $b'_{1m}$  大于 0。此时  $A = \{m, m + 1, \dots, N\}$ ,  $k = b'_{1m}$ 。根据式(18)和式(7)计算子载波  $i \in A$  在第一阶段分配的比特数  $b_{1i}$  和功率  $\varepsilon_{1i}$ 。

(3) 根据式(19)~(21)调整第一阶段分配的比特, 根据式(22)求剩余比特数  $R_{\text{res}}$ , 根据式(23)求子载波集  $M$ 。对有加载能力的每个子载波  $n \in M$  分组后按组值从小到大排列, 组内子载波按其  $g_n$  值从大到小排列。

(4) 按组和组内子载波的顺序, 依次为可加载的子载波每次加分 1 比特, 更新  $b'_{2i} = b'_{2i} + 1$ ,  $R_{\text{res}} = R_{\text{res}} - 1$ , 更新  $M$ , 循环直到子载波集  $M = \emptyset$  或剩余的比特数  $R_{\text{res}} = 0$  时为止, 根据式(7)计算子载波  $i$  在第二阶段分配的功率  $\varepsilon_{2i}$ ,  $i \in A$ 。

(5) 根据第二阶段分配的结果, 利用式(8)计算

全部子载波的功率增量  $\Delta e_i(b_i)$ 。根据式(24)和约束条件找到可以比特交换的子载波对  $(i, j)$ , 根据式(25)~(27)进行比特交换、功率调整和功率增量更新, 最后计算分配的总功率等性能指标。

为了对比, 下面给出改进的位添加查表算法:

(1) 根据每子载波的载噪比, 比特允许最大值和功率上限确定每子载波最大可分配比特数, 以该比特数为上限建立每个子载波增减 1 比特的功率变量表。

(2) 在平均分配总比特下, 求出每个子载波现超出比特数和还可加分比特数, 并把子载波分成已超出子载波集和还可加分子载波集。

(3) 求已超出子载波集的超出比特总数, 并按位添加法在还可加分子载波集中执行逐位比特添加查表分配。

(4) 按最优准则分配和调整算法中的第三阶段进行比特交换和功率调整, 以减少总发射功率。

#### 4 算法分析与仿真

设 OFDM 系统子载波数为  $N$ , 最优准则分配和调整算法(算法一)在第一阶段分配的运算量为  $O(3N + M \log_2 N + 2L_1)$ , 其中  $L_1$  为剔除子载波数; 第二阶段调整的运算量为  $O(2(N - L_1) + 3L_2)$ , 其中  $L_2$  为可加载比特子载波数; 第三阶段交换的运算量为  $O(2N + 10L_3)$ , 其中  $L_3$  为交换比特数。由于  $L_1, L_3 \ll N$ , 因此其总运算量为  $O(7N + M \log_2 N + 3L_2)$ 。而改进位添加查表算法(算法二)中  $N_1$  为可加配子载波数,  $M_1$  为超出比特总数, 其总运算量为  $O(10N + N_1(M_1 + 3))$ , 相比于位添加法(算法三), 算法一不需要迭代分配比特, 而算法二仅对超出比特总数进行迭代分配, 且在每次迭代过程中仅对可加配子载波查表和分配, 因此算法一的运算量小于算法二, 而远小于算法三。

在电力线信道环境下验证算法<sup>[5]</sup>, 设子载波数为 128, 频带范围为 0~20 MHz, 功率谱上限为  $-50 - 0.8f$  (dBm/Hz),  $f$  的单位为 MHz。噪声为色噪声, 误码率为  $10^{-4}$ , 不使用信道编码, 待发总比特数分别为  $[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6] * 128$ , 子载波最大分配比特数为 6。根据文献[8]中 QAM 调制的信道载噪比和调制比特数曲线, 得到表 1 所示的比特分配关系。

图 1 是在平均比特数为 3 的条件下, 子载波上比特分配的结果。可以看出, 算法一在比特交换前后分配的比特有所不同, 算法二与算法三相同, 而与算法一稍微不同, 但 3 种算法分配的总比特数相同, 参加分配的子载波数也相同。

图 2 是在平均比特数为 3 的条件下, 子载波上

功率分配的结果, 其中虚线表示子载波的功率上限。

由图可见子载波上分配的功率都未超出其功率限制, 算法一在比特交换前后分配的功率有大的不同, 算法二与算法三相同, 算法一(交换后)与算法二、三也稍有不同。虽然他们分配总比特数相同, 但分配比特位置的不同而使分配的总功率也稍有区别。

表 1 分配比特数与子载波载噪比的关系

Tab.1 Relation of allocation bit number and subcarrier CRN

分配比特数	子载波载噪比/dB	分配比特数	子载波载噪比/dB
0	(0, 6.2)	4	[18.53, 22.9)
1	[6.2, 12.1)	5	[22.9, 26.16)
2	[12.1, 15.9)	6	[26.16, 28.6)
3	[15.9, 18.53)	7	[28.6, +∞)

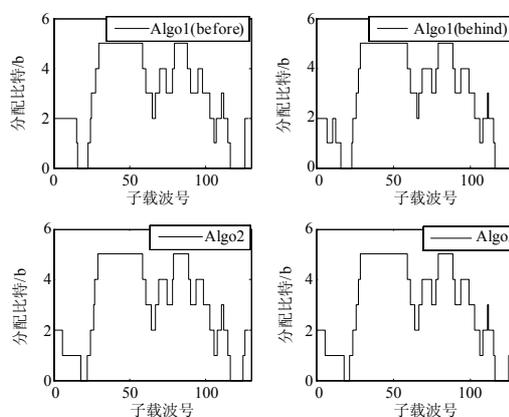


图 1 子载波上比特分配结果

Fig.1 Results of bit allocation on subcarriers

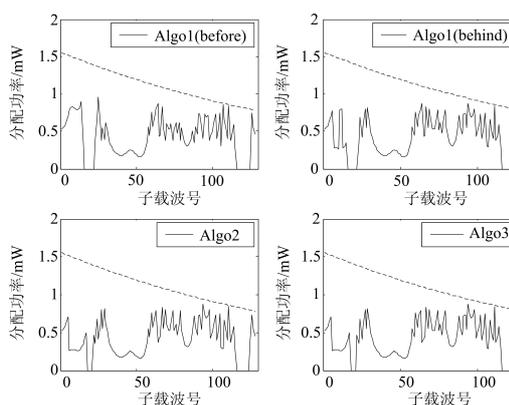


图 2 子载波上功率分配结果

Fig.2 Results of power allocation on subcarriers

表 2 为待分配平均比特数为  $[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6]$  时, 文中 3 种算法仿真结果的比较。由表可见, 在电力线信道仿真条件下, 当平均比特数大于 3 时系统就有剩余比特不能分配, 且随平均比特数的最大而增加, 在平均比特数为 5 时系统容量过饱和, 此后增加平

均比特只会增大剩余比特数，而系统其它性能几乎不变；随着平均比特数的增加，参加分配的子载波数增加，但当分配比特有剩余时其子载波数增加不明显，这说明有些子载波由于载噪比太低是不能被使用的；在平均比特数在 1、5、6 时，3 种算法性能一样，而平均比特数在 2、3、4 时他们性能才有微小区别，即算法二与算法三性能一样而稍微优于算法一性能。

表 2 资源分配结果比较

Tab.2 Comparison of resource allocation results

平均比特数	分配比特数/剩余比特数 /参加子载波数		分配功率总值/mW	
	法一	法二/法三	法一 前/后	法二 /法三
	1	128/0/56	128/0/56	3.62/3.6
2	256/0/83	256/0/83	14.7/14.1	14.1
3	384/0/111	384/0/116	54.6/53.5	53.2
4	430/82/120	431/81/121	71.5/70.7	70.7
5	435/205/123	435/205/123	72.1/72.1	72.1
6	435/333/123	435/333/123	72.1/72.1	72.1

### 5 结论

研究适合于电力线通信的比特分配算法，对于改善高速电力通信系统的服务质量和资源利用率具有重要意义。本文针对电力线通信系统的限制条件，探讨其发射总功率最小的最优分配准则，提出基于最优准则的单用户资源分配、调整和交换算法，并分析其复杂度。在电力线环境下仿真结果表明本文算法性能与改进的位添加查表算法性能相当，接近位添加法；而其运算复杂度低于位添加查表算法，远小于位添加法，故本文算法可适合于电力线信道自适应 OFDM 系统。

### 参考文献

[1] ZHENG Tao, YANG Xiao-xian, ZHANG Bao-hui. Broadband Transmission Characteristics for Power-Line Channels[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 1905-1911.

[2] Papandreou N, Antonakopoulos T. Resource Allocation Management for Indoor Power-line Communications Systems[J]. IEEE Trans on Communications, 2007, 22(2): 893-903.

[3] 樊凌雁, 何晨, 冯国瑞. MIMO-OFDM 系统下的自适应迭代比特分配算[J]. 通信学报, 2007, 28(11): 65-70.

FAN Ling-yan, HE Chen, FENG Guo-rui. Adaptive

Iterative Bit Allocation Algorithm for MIMO-OFDM System[J]. Journal on Communications, 2007, 28(11): 65-70.

[4] 丁乐, 殷勤业, 邓科, 等. 一种无线 OFDM 系统的高效功率和比特分配算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1537-1541.

DING Le, YIN Qin-ye, DENG Ke, et al. A Computationally Efficient Transmit power and Bit Allocations Algorithm for Wireless OFDM Systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(7): 1537-1541.

[5] 赵宇明, 王赞基, 郭静波, 等. 考虑功率谱限制的电力线通信比特分配算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 143-148.

ZHAO Yu-ming, WANG Zan-ji, GUO Jing-bo, et al. A Noval Bit-loading Algorithm for Energy Spectrum Limited Power-line Communication Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 143-148.

[6] 张文强, 周志杰, 郑翔. 一种 MIMO OFDM 系统中的自适应比特和功率分配算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 340-343.

ZHANG Wen-qiang, ZHOU Zhi-jie, ZHENG Xiang. Adaptive Bit and Power Allocation Algorithm for MIMO OFDM Systems[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(2): 340-343.

[7] 赵宇明, 郭静波, 王赞基, 等. 电力线高速通信中比特交换和功率调整算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(10): 1645-1648.

ZHAO Yu-ming, GUO Jing-bo, WANG Zan-ji, et al. Bit Swap and Power Reallocation Algorithm for Power-line High-speed Communication Systems[J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2006, 46(10): 1645-1648.

[8] Andrea J G, Soon G C. Variable-rate Variable-power MQAM for Fading Channels[J]. IEEE Trans on Communications, 1997, 45(10): 1218-1230.

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-04-20

#### 作者简介:

方拥军 (1975-), 男, 硕士研究生, 从事计算机通信方面的研究;

徐志强 (1975-), 男, 博士研究生, 从事电力通信中资源分配的研究; E-mail: xu8282836@163.com

翟明岳 (1971-), 男, 硕士生导师, 从事电力通信中关键技术的研究。