

文章编号: 1673- 0062(2010) 02- 0042- 05

电力线通信系统中基于动态规划的自适应资源分配

方拥军

(南华大学 资产管理处, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 分析了电力线通信 OFDM 系统在多种约束下, 多用户多业务在多子载波上自适应的比特和功率分配模型, 提出了 1 种新的基于动态规划的速率和功率自适应相结合的动态资源分配算法, 其先给实时用户分配资源以满足固定速率下总功率最小, 再利用剩余功率和未用子载波给非实时用户分配资源以满足最小速率下总速率最大. 在典型电力线信道环境下的仿真结果表明, 该算法的性能优于已有的多用户资源分配优化算法, 且其能更好的满足电力线通信系统中多用户资源分配的多目标要求.

关键词: 电力线通信; 自适应 OFDM; 资源分配; 优先因子; 动态规划

中图分类号: TN 911; TM 73 **文献标识码:** A

Adaptive Resource Allocation Based on Dynamic Programming for Power-line Communication Systems

FANG Yong-jun

(Department of Assets Administration, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract The adaptive bit and power allocation model for multiuser and multiserver in power-line communication OFDM systems is analyzed with the multifarious restrictions. A novel resource dynamic allocation algorithm with rate and power adaptation based on dynamic programming is proposed, which firstly assigns resource for every real time user so as to satisfy their fixed rates and minimize the total used power; then assigns the remainder power and non-used subcarriers for every non-real time user so as to satisfy their minimal rates and then maximize the total assigned bit number. The algorithm is tested in the typical power-line channel environment and the simulation results indicate that the algorithm has the better performances than the known multiuser resource optimization allocation algorithms and it realizes better the multiple aims of multiuser resource allocation for power-line communication systems.

Key words power-line communication; adaptive OFDM; resource allocation; priority factor; dynamic programming

收稿日期: 2010- 03- 24

基金项目: 衡阳市科技局基金资助项目 (2009KJ12)

作者简介: 方拥军 (1975-), 男, 湖北咸宁人, 南华大学工程师, 硕士研究生. 主要研究方向: 计算机通信.

0 引言

对于存功率谱等约束的电力线通信系统, 通过合理地利用自适应 OFDM 和资源优化分配技术, 实现传输总速率最大化或发射总功率最小化目标, 可以有效改善了信道的频率、时间和空间选择性衰落对高速电力线通信的影响^[1], 有效提高系统的频带利用率和服务质量^[2]. 多用户自适应 OFDM 技术实现的一个关键部分是子载波、比特和功率的分配. 目前, 研究人员针对不同的优化目标和约束条件提出了多种多用户动态资源分配算法. 文献[1]针对室内电力线通信 OFDM 系统提出一种在功率谱限制下多载波的子信道和功率分配算法, 仿真了多种可变信道条件下算法的性能. 文献[3]针对电力线通信系统提出了一种在功率谱限制条件下的比特分配算法. 在分析最优分配准则的基础上利用贪婪原理设计分配算法, 降低了算法的运算量, 而文献[4]在上研究的基础上, 讨论了适用不同优化准则的电力线高速通信比特交换算法, 并根据电力线高速通信的应用条件, 提出了功率谱限制条件下的交换算法.

虽然上述文献虽然研究了单相电力线通信系统的多用户资源问题, 但他们的研究没有考虑在功率和速率限制下先满足 RT 用户要求固定速率时系统所用的功率和子载波资源尽可能小, 然后在系统剩余资源下先满足 NRT 用户要求最小速率下寻求系统总速率最大化的多层多目标问题, 也没有考虑其设计的算法是否能满足系统资源充足或缺少的情况. 本文针对电力线通信 OFDM 系统在每时隙最大总功率、各实时用户要求固定速率、各非实时用户要求最小速率、各子载波分配最大功率和比特数约束下, 多用户多业务在多子载波上自适应的资源分配数学模型, 提出了一种新的基于动态规划的速率和功率自适应相结合的动态资源分配算法, 并在典型电力线信道环境下进行仿真, 结果表明其能满足电力线通信多用户多业务资源分配的多目标要求.

1 资源分配模型

考虑电力线通信自适应 OFDM 系统每时隙有 M 个 OFDM 符号, 每 OFDM 符号有 L 个子载波, 每时隙的 $N = M \times L$ 个子载波服务于 2 种业务. 设 RT 业务用户集 Ω_1 , 用户数为 K_1 , 每用户 k 要求的固定速率为 R_k^1 和目标 BER 为 P_e^1 ; NRT 业务用户集 Ω_2 , 用户数为 K_2 , 每用户 k 要求的最小速率为

R_k^2 和目标 BER 为 P_e^2 . 由于每子载波仅供一个用户使用, 用户间正交而无干扰, 则用户 k 在子载波 n 上需要分配的功率 $p_{k,n}$ 为

$$p_{k,n} = (2^{r_{k,n}} - 1) \Gamma_k / g_{k,n} \quad (1)$$

其中 $r_{k,n}$ 和 $g_{k,n}$ 分别表示用户 k 在子载波 n 上分配比特数和信道单位功率信噪比, Γ_k 为用户 k 的子载波采用 MQAM 调制时的信噪比差值, 其表示为

$$\Gamma_k \approx \begin{cases} [Q^{-1}(P_e^1/4)]^2/3, & k \in \Omega_1 \\ [Q^{-1}(P_e^2/4)]^2/3, & k \in \Omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $Q^{-1}(x)$ 为错误概率函数的逆函数.

为限制电力线通信的电磁干扰, 通过认知无线电技术感知各子载波上已存在的干扰^[5], 从而确定系统每时隙总发射功率为 P_s . 每子载波 n 上发射信号的功率上限为 p_n . 为了降低系统实现的复杂度, 设每子载波对上分配的比特数为 0, 1, 2, 4, 6, 8.

对于实际的电力线通信系统, 要求其在上述条件的约束下, 在每时隙先保证 RT 业务用户传输固定速率下尽可能地降低其发射总功率, 再保证 NRT 业务用户传输要求速率下尽可能地降低其发射总功率, 后在系统剩余功率下尽可能地增大 NRT 业务的总速率^[6], 从而其资源分配问题的数学模型为

$$\begin{aligned} \min \text{ } & \text{ } f_1(r_{k,n}) = \sum_{k=1}^{K_1} |\sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n} - R_k^1|, \quad k = 1, 2, \dots, K_1 \\ \min \text{ } & \text{ } f_2(r'_{k,n}) = \sum_{k=K_1+1}^{K_1+K_2} |\sum_{n \in \Omega_k} r'_{k,n} - R_k^2|, \quad k = K_1 + 1, \dots, K_1 + K_2 \\ \max \text{ } & \text{ } f_3(r''_{k,n}) = \sum_{k=K_1+1}^{K_1+K_2} \sum_{n \in \Omega_k} r''_{k,n}, \quad k = K_1 + 1, \dots, K_1 + K_2 \\ \min \text{ } & \text{ } f_4(r_{k,n}) = P_t - \sum_{k=1}^{K_1+K_2} \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n} \\ s.t. \quad & \sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n} = R_k^1, \quad k = 1, 2, \dots, K_1 \\ & \sum_{n \in \Omega_k} r_{k,n} \geq R_k^2, \quad k = K_1 + 1, \dots, K_1 + K_2 \\ & \sum_{k=1}^{K_1+K_2} \sum_{n \in \Omega_k} p_{k,n} \leq P_t \\ & 0 \leq p_{k,n} \leq P_n \\ & r_{k,n} \in \{0, 1, 2, 4, 6, 8\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $r'_{k,n}$ 和 $r''_{k,n}$ 为对 NRT 业务用户资源分配时所在不同阶段的 $r_{k,n}$. 上资源分配问题为多目标混合整数非线性规划问题, 其混合整数非线性规划

特点使其寻优在单目标规划中难度加大;其多目标规划特点使其寻优不再是求解单个的全局最优解,而是求出尽可能多的 Pareto最优解. 从而其算法不再同于以往,必须利用其的特点寻找其最优解法^[7]. 分析式(3)的资源分配模型,其算法步骤可为在每时段内先给 RT 业务用户分配资源,再给 NRT 业务用户分配资源,后给 NRT 业务用户分配剩余资源. 虽上多目标分解使本文资源分配等效于多个单目标的混合整数非线性规划寻优问题,但整数非线性规划问题全局最优解不易求得,现在常用的算法都是次优近似解法,而本文利用动态规划(DP)的特点非常方便求得整数规划问题的全局最优解.

2 基于动态规划的资源分配算法

2.1 动态规划原理

对于许多不能用微分法求解的非线性最优化问题,DP常会比线性或非线性规划方法更为有效^[8]. 为使寻优问题的原始数学描述能转换为适于DP的等价表达式,其必须满足如下的贝尔曼最优性原理.

设有一 n 级(阶段)的决策问题,记级为 $s = 1, 2, \dots, n$, λ_s 为级 s 的状态变量, $x_s(\lambda_s)$ 为级 s 的决策变量,最优目标函数为 $g_s(\lambda_s) =$

$$\text{opt} \{ \sum_{j=s}^n f_j(x_j) \}, \text{ 其中 opt 表最优符号 max 或 min}$$

$\odot$ 表运算符 $\sum$ 或 $\prod$, $f_j(x_j)$ 表各级 j 最优函数. 一旦 λ_s 和 $x_s(\lambda_s)$ 被选定,级 $s-1$ 级的状态变量为 $T(\lambda_s, x_s(\lambda_s))$,此即状态转移方程. 再构造一组特殊类型的泛函方程,能够以简单的顺序方式从 $g_{s-1}(\lambda_{s-1})$ 计算出 $g_s(\lambda_s)$

$$\begin{cases} g_1(\lambda_1) = \text{opt}_{x_1} \{ f_1[\lambda_1, x_1(\lambda_1)] \} \\ g_s(\lambda_s) = \text{opt}_{x_s} \{ f_s[\lambda_s, x_s(\lambda_s)] \} g_{s-1}(T[\lambda_s, x_s(\lambda_s)]), s = 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

或逆序方式从 $g_s(\lambda_s)$ 计算出 $g_{s-1}(\lambda_{s-1})$

$$\begin{cases} g_n(\lambda_n) = \text{opt}_{x_n} \{ f_n[\lambda_n, x_n(\lambda_n)] \} \\ g_s(\lambda_s) = \text{opt}_{x_s} \{ f_s[\lambda_s, x_s(\lambda_s)] \} g_{s+1}(T[\lambda_s, x_s(\lambda_s)]), s = n-1, \dots, 1 \end{cases} \quad (5)$$

设求解

$$\text{max} z = \sum_{j=1}^n \phi_j(x_j) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{kj})$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n h_{ij}(x_j) \leq b_i, (i = 1, 2, \dots, m)$$
$$x_{ij} \in Z_0^{b_i}, (l = 1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

定义级 s 的状态变量为 $\lambda_s = (\lambda_{1s}, \lambda_{2s}, \dots, \lambda_{ms})$ 和决策变量为 $x_s = (x_{1s}, x_{2s}, \dots, x_{ks})$, 状态转移方程为

$$\lambda_{i, s-1} = T(\lambda_{is}, x_s(\lambda_{is})) = \lambda_{is} - h_{is}(x_s) \quad (7)$$

令 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, $h_s(x_s) = (h_{1s}(x_s), h_{2s}(x_s), \dots, h_{ms}(x_s))$, 则顺序方式递推关系为

$$\begin{cases} g_1(\lambda_1) = \max_{0 \leq x_1 \leq r_{q_1}} \phi_1(x_1) \\ g_s(\lambda_s) = \max_{0 \leq x_s \leq r_{q_s}} \{ \phi_s(x_s) + g_{s-1}(\lambda_s - h_s(x_s)) \}, \\ s = 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示各分量向下取整, ξ 为下式的解

$$\lambda_s - h_s(\xi) = 0 \quad (s = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

由于电力线通信系统一个 OFDM 符号内子载波太多,加上其资源分配的特殊约束,采用现有的优化分配算法其运算量太大. 结合DP可以把一个 n 维最佳化问题变换为 n 个一维最佳化问题求解的特点,本文在降维上先把子载波分给用户,再在每用户的用户子载波对上采用DP思想分配资源.

设分给各用户 k 的子载波集为 Ω_k , 把集 Ω_k 内各子载波当作一个阶段 n_k , 其状态变量为 (p_{res}^n, R_{kass}^n) , 其中 p_{res}^n 为 n 阶段的剩余系统总功率, R_{kass}^n 为 n 阶段对应的 k 用户已分配的速率, 则其各阶段决策变量 $r_{k,n}$ 由该阶段用户子载波对的最大分配比特、已分配比特、离散比特和剩余比特约束共同决定. 这样在系统剩余功率、各用户要求速率和子载波功率谱、比特数等约束下,按式(7)~式(9)采用动态规划分配资源以求各用户消耗的总功率最小,其状态转移方程为

$$\begin{cases} p_{res}^n = p_{res}^{n-1} - p_{k,n} \\ R_{kass}^n = R_{kass}^{n-1} - r_{k,n} \end{cases}, n = 1, 2, \dots, |\Omega_k| \quad (10)$$

由于式(3)中各阶段决策变量 $r_{k,n}$ 的限制,在仿真中不能完全按式(7)~式(9)采用动态规划分配资源,但可以把各用户资源动态规划分配中的等式约束通过罚因子而转换到目标函数中,从而有

$$\text{min} p_k = \sum_{j=1}^n (2^{k_j} - 1) \Gamma_k \sigma_{k,j}^2 / g_{k,j}^2 + M - 1$$

$$s \quad t \quad r_{kj} = \{0 \ 1 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8\} \quad (11)$$

其中 M 是远大于 1 的实数。

2.2 RT 业务用户固定要求资源分配

在给子载波分配比特和功率前, 需要确定子载波与用户的归属问题。对于 RT 业务, 其固定速率必须在最大时延内完成, 调度时选择那些最早到达 deadline 并且信道状况最好的用户优先服务, 因此把第 u 子载波分配给 RT 业务用户 i 的优先级^[9] 为

$$pRT_{int} = a_i \frac{g_{i,u}}{\sum_{i \in \Omega_1} g_{i,u}} \exp \left[\frac{aw_i - \overline{AW}}{1 + \sqrt{\overline{AW}}} \right] \quad (12)$$

式中 $\overline{AW} = \frac{1}{K_1} \sum_{i \in \Omega_1} a_i w_i$, w_i 表第 i 个用户其排在队列头的分组的已等待时间, a_i 是与第 i 个用户的加权因子。

根据实时业务的最大时延 T_i 越小, 每时隙固定速率 R_k^i 越大和本时隙内各 OFDM 符号前已完成速率 u_i 越小, a_i 值应越大的原理选择 a_i 为

$$a_i = \frac{R_k^i - u_i}{T_i} \quad (13)$$

本算法 RT 业务用户资源分配步骤如下:

1) 初始化待分配子载波集 $S = \{1 \ 2 \ \dots \ N\}$, 每帧资源分配前 $u_i = 0 \ i \in \Omega_1$;

2) 按下式先为 RT 业务用户 k 分配第 n 子信道;

$$k_n = \arg \max_{i \in \Omega_1, u \in S} \{pRT_{int}\} \quad (14)$$

3) 将子信道 n 从集 S 中清除, 循环直到集 S 为空, 子载波归属 RT 业务用户的分配结束, 否则转至 2)。

4) 对于每 RT 业务用户 k 找到时隙内其归属的子载波集 Ω_k 采用动态规划思想按式 (11) 分配资源, 注意当用户 k 的速率达到要求固定速率时, 用户 k 即使有未用的子载波, 即使其信道状态非常好也不再给其分配资源; 当系统功率分配完, 也不会给后面的良好信道分配资源。

5) 由各阶段决策变量 $r_{k,n}$ 统计各 RT 业务用户比特分配情况, 总功率和子载波剩余等情况。

2.3 NRT 业务用户最小要求资源分配

由于 NRT 业务对时延没有非常严格要求, 资源分配算法应在保证用户间的公平性及最小速率的基础上, 最大化系统吞吐量。当第 u 个子信道未分配给 RT 业务时, 可以将其按下式分配给第 i 个 NRT 业务

$$pNRT_{int} = \beta_i \frac{g_{i,u}}{\sum_{i \in \Omega_2} g_{i,u}} \quad (15)$$

式中 β_i 为第 i 个 NRT 业务用户的加权因子

$$\beta_i = \frac{R_i^2 - u_i}{R_i^2} \quad (16)$$

本算法 NRT 业务用户资源分配步骤如下:

1) 统计系统剩余的子载波集 $S_1 = \{1 \ 2 \ \dots\}$, 剩余的总功率 P_{res} 每帧资源分配前 $u_i = 0 \ i \in \Omega_2$;

2) 按下式先为 NRT 业务用户 k 分配第 n 子信道;

$$k_n = \arg \max_{i \in \Omega_2, u \in S_1} \{pNRT_{int}\} \quad (17)$$

3) 将子信道 n 从集 S_1 中清除, 循环直到集 S_1 为空, 子载波归属 NRT 业务的分配结束, 否则转至 2)。

4) 在系统总剩余功率、各 NRT 用户要求平均速率 R_k^2 和子载波功率谱、比特数等约束下, 按照 RT 业务用户动态规划分配资源的算法以求 NRT 业务用户在满足最小要求速率时消耗总功率最小的分配。

5) 由其各阶段决策变量 $r_{k,n}$ 统计各 NRT 业务用户比特分配情况, 总功率和子载波剩余等情况。

2.4 NRT 业务用户剩余资源分配

由于优化目标是在满足各用户要求速率后再最大化系统总速率, 故而把剩余资源补分给 NRT 业务用户的步骤如下:

1) 统计时隙内未用子载波和各 NRT 业务用户已用子载波, 统计剩余总功率, 由子载波 n 找到相应 NRT 业务用户 k 把各子载波 n 当作一个阶段, 设各阶段状态变量为 P_{res}^n , 各阶段决策变量 $r_{k,n}$ 由该阶段用户子载波对的最大分配比特、已分配比特和离散比特约束共同决定。这样在系统剩余总资源、子载波功率谱和比特数等约束下, 按式 (7) ~ 式 (9) 动态规划分配资源思想, 结合下式分配资源以求 NRT 用户的总速率 B 尽可能最大。

$$\max B = \sum_{k=K_1+1}^{K_1+K_2} \sum_{j=1}^n r_{kj} + M \mid \sum_{k=K_1+1}^{K_1+K_2} \sum_{j=1}^n (2^{r_{kj}} -$$

$$1) \Gamma_k \sigma_{kj}^2 / g_{kj} - P_{res} \mid \quad s \quad t \quad r_{kj} = \{0 \ 1 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8\} \quad (18)$$

2) 统计该时隙内各用户资源分配情况, 总功率和子载波剩余情况等系统性能参数。

3 仿真与分析

在实际的电力线信道环境下^[4], 对上资源分

配算法进行了仿真. 设 OFDM 系统每时隙内仅有 1 个 OFDM 符号, 子载波数为 128, 频带范围为 0 ~ 20 MHz, 噪声为色噪声, 不使用信道编码, 功率谱上限为 $-50-0.8f$ (dBm/MHz), 其中 f (MHz) 为频率, 每个子载波最大比特数为 8, 系统总功率为 10 mW. RT 业务用户集 $\Omega_1 = \{1, 2\}$, 用户数为 $K_1 = 2$ 对应最大时延为 $\{1, 1.25\}$ 个 OFDM 符号周期, 每用户 k 要求的固定速率在仿真中都可变, 目标误码率为 10^{-4} ; NRT 业务用户集 $\Omega_2 = \{3, 4\}$, 用户数为 $K_2 = 2$ 每用户 k 要求的最小速率在仿真中也可变, 目标误码率为 10^{-6} . 设用户 1 的要求速率 (bits/symbol) 为基准速率 R_1 , 所有 RT 业务用户的固定速率为 $\{R_k, 0.7R_1\}$, 所有 NRT 业务用户的最小速率为 $\{0.5R_1, 0.8R_1\}$. 为方便, 简称速率的单位 bits/symbol 为 bits

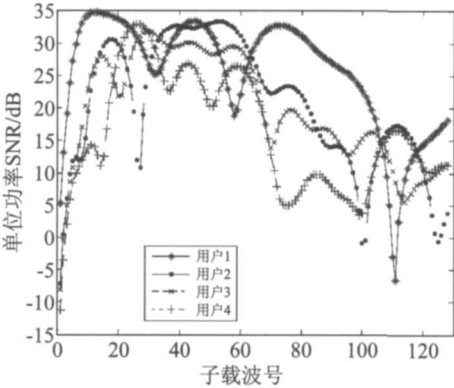


图 1 各用户的单位功率信噪比曲线
Fig 1 Unit power SNR curves of every user

图 1 是在电力线信道环境下产生的 4 个用户单位功率信噪比曲线. 4 条曲线变化相似, 其中用户 1 的信噪比整体上最好, 用户 2 和用户 3 的相差不大, 而用户 4 的信噪比整体上最差.

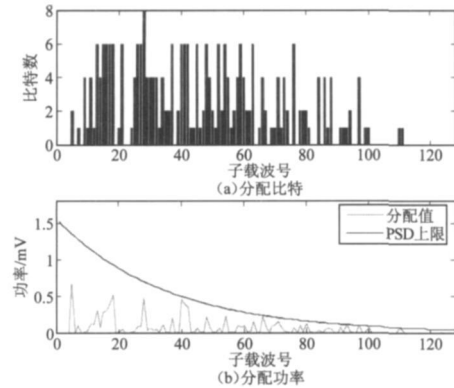


图 2 各子载波分配的比特和功率

Fig 2 Assigned bits and power on every subcarrier

图 2 是在基准速率 R_1 为 60 bits 下, 本文算法给每个子载波分配的比特和功率结果. 由图 2 (a) 可知: 每子载波上分配的比特均满足约束要求; 其中有些子载波未分配, 这是其信道状态对任一用户而言都恶劣, 故而被关闭使用; 有些子载波分配多比特, 这是因为其信道状态良好, 当然并非对某用户良好的子载波就定要分配多的比特, 这还与用户子载波对的分配等有关. 由图 2 (b) 可知: 每子载波上分配的功率都满足功率上限约束等要求; 被关闭的子载波一定没分配功率; 分配功率的子载波其功率不一定与分配的比特成正比, 这与子载波的信道状态有关.

表 1 两种算法资源分配结果的比较
Table 1 Resource allocation results comparisons of two algorithms

要求速率 / 本文速率 / 对比速率 (bits/sym)				总剩余功率 (mW) 本文 / 对比
用户一	用户二	用户三	用户四	
30	21	15/255/110	24/48/69	0.064/0.139
40	28	20/246/73	32/46/67	0.002/0.019
50	35	25/232/54	40/45/62	0.068/0.177
60	42	30/211/46	48/50/48	0.043/1.211
70	49	35/191/36	56/56/48	0.056/1.737
80	56	40/140/32	64/64/36	0.076/3.431

为了对比, 仅把本文算法中所有按动态规划分配资源的步骤改为按贪婪逐比特查表^[10]分配资源. 由表 1 可知: 当基准速率小时, 各用户要求速率均可满足, 且基准速率越小其差值越大, 其分配剩余功率都不大, 两种算法的剩余总功率都不大; 随着基准速率的增大, RT 业务用户速率仍满足要求, 本文算法对 NRT 业务用户速率仍满足要求, 但其总速率在下降, 而对比算法对 NRT 业务用户速率先满足要求后不满足要求, 且其总速率也在下降但没本文算法的快. 随着基准速率的增大, 两种算法的总速率先快后慢地减少, 但本文算法的总大于对比算法的, 而他们的总剩余功率大体上在增加, 但对比算法的总大于本文算法的. 所有这些说明本文算法的综合性能优于对比算法的.

4 结论

本文针对电力线通信 OFDM 系统在每时隙的最大总功率、各实时用户要求固定速率、各非实时用户要求最小速率、各子载波分配最大功率和

(下转第 56 页)

4 实验与结论

为了验证设计的电路及控制方法的正确性,试制了样机电路,经反复地调试,最终确定了各个元器件及程序,初级与次级能在 2~ 100 mm 内实现无线磁耦合感应电能充电控制,并且能进行多个负载输出单独充电,很好地实现了谐振频率搜寻锁定以及充电电流稳定控制功能.但是本设计在感应圈设计方面仍然还有很大改进的空间,需要进一步研究与探索,优化设计,以使传输效率达到更高.

该控制方法能克服感应圈的漏感大,耦合系数随着耦合的松紧而实时改变,电磁干扰大,变换器效率低等缺点.该装置及其控制方法具有好的

推广价值,可以向可携式设备、消费电子和通讯设备领域扩展应用.

参考文献:

[1] 刘志宇,都 东,齐国光. 感应充电技术的发展与应用 [J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 92- 94

[2] 张 敏,周维维. 松耦合感应电能传输系统的分析 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2006, 29(7): 33 - 37.

[3] 徐德鸿. 开关电源设计指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004

[4] 朱建华,罗方林. 功率谐振变换器及其发展方向 [J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 55- 59.

[5] 李学海. PIC 单片机实用教程: 基础篇 [M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.

(上接第 46 页)

比特数约束下,多用户在多子载波上自适应比特和功率分配的数学模型,提出了一种新的基于动态规划的速率和功率自适应相结合的资源分配算法.在典型电力线信道环境下的仿真结果表明,该算法的性能优于已有的多用户资源分配优化算法,且能更好地满足电力线通信中多用户资源分配的多目标要求.

参考文献:

[1] Nikolaos P, Theodore A. Resource allocation management for indoor power- line communications systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 22(2): 893- 903

[2] Kim B S. Link- adaptive physical layer for indoor broadband power- line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 103- 110

[3] 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): 43- 148

[4] 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

[5] Oh S W, Chiu Y L, Ng K N, et al Cognitive power line communication system for multiple channel access[C] // Lutz Lampe. 2009 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications USA: IEEE, 2009. 47- 52

[6] 张冬梅,徐友云,蔡跃明. OFDMA 系统中的功率和比特高效分配算法 [J]. 通信学报, 2008, 29(4): 108 - 113

[7] 徐志强,翟明岳,崔 翔,等. 基于资源因子的电力线通信系统自适应资源分配 [J]. 中国通讯 (中英文版), 2009, 6(4): 55- 63

[8] 甘应爱,田 丰,李维铮,等. 运筹学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005

[9] 孙 卓,彭木根,王文博. 保证混合业务质量的跨层 OFDMA 资源分配方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(6): 3- 57.

[10] Guerrini E, Amico G D, Bisaglia P, et al Bit- loading algorithms and SNR estimate for HomePlug AV [C] // Lutz Lampe. 2007 International Symposium on Power Line Communications and Its Applications USA: IEEE, 2007. 77- 82