

平稳信道的非迭代比特分配算法及其在 电力线正交频分通信中的应用

唐博进, 郭静波

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市海淀区 100084)

A NOVEL NON-ITERATIVE DYNAMIC BIT-LOADING ALGORITHM FOR STATIONARY CHANNELS AND ITS APPLICATION IN OFDM POWER LINE COMMUNICATIONS

TANG Bo-jin, GUO Jing-bo

(Tsinghua University, Department of Electrical Engineering, State Key Lab of Power Systems,
Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Due to its outstanding performance in frequency utilization and overcoming the multi-path fading, OFDM has been the optimal technology in power line communications. As the power line channel was stationary in time domain, a novel algorithm was proposed in this paper which utilizes the last time bit-loading results and the new channel characteristic to get the new scheme without iteration and the complexity of algorithm has been simplified dramatically. The new algorithm was tested by practical continuous measured data, and was proved to be correct and efficient. The complexity of this algorithm is analyzed and compared to the other typical bit-loading algorithms, the obvious advantage is shown.

KEY WORDS: Power line OFDM communications; Stationary channel; Dynamic bit-loading; Energy-tightening; Bit-tightening

摘要: 正交频分(OFDM)传输以它很高的频谱利用率和抗多径的能力成为电力线通信的优选方案。针对电力线信道时域平稳的特点,该文提出一种新的比特分配算法,利用上次比特分配结果和当前信道特性进行OFDM子信道非迭代比特分配。连续实测的电力线信道的比特分配计算机仿真表明所提出的算法快速有效。该算法的计算复杂度优于典型的比特分配算法。

关键词: 电力线正交频分复用通信; 平稳信道; 动态比特分配; 功率限制; 速率限制

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177016)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50177016).

1 引言

正交频分复用(OFDM)^[1-2]已成为近年来高速数字通信的关键技术。它的符号周期延长了 N 倍(N 为子信道数),可以有效抵抗通信中多径的影响,且较多的子载波可以显著减少时域均衡滤波器的复杂度,因此它已成为新一代无线通信的核心技术。欧洲已把它作为无线数字音视频广播的标准^[3],北美则以此技术制定了ADSL的标准^[4]。

OFDM传输也是电力线通信的优选方案。电力网拓扑结构复杂,信道传输特性随频率变化且有明显的多径效应,再加上各种用电设备的开关噪声,以及外部电磁环境对电力线的影响,电力线通信环境相当恶劣^[5-9]。将OFDM引入电力线通信的最明显优越性是提高频谱利用率和抗多径效应,实现高速数据可靠传输,基于电力线的各种宽带应用成为了目前的一个研究热点^[10-13]。

根据传输信道的衰减和噪声水平,动态分配传输数据是电力线信道频谱资源有效利用的保证^[14]。

经典的注水算法为OFDM子信道提供了最优的比特分配^[15],但其算法的计算复杂度过高而难于在实际系统中实现。近十几年,OFDM系统的比特分配研究引起了广泛的兴趣,依据优化目标的不同(传输能量限制ET、错误概率、传输速率限制BT)许多优化比特分配算法被相继提出^[16-26]。为了达到加快算法速度的目的,除位添加法^[16]外,它们都转而在某一限制条件下寻求次优解,例如文献[17]算

法得出的功率分配与最优解会有大约 3dB 之内的误差。但上述所有算法都是针对无线或 ADSL 信道,且在信道变化后都重新计算分配方案,并不利用上次的分配结果。

电力线信道不同于无线或 ADSL 信道,它既不像 ADSL 信道几乎不随时间变化,也不像移动无线信道变化那样剧烈和迅速。由于电力网的拓扑结构相对固定,不同时刻用电负载随机接入或断开,由此造成了电力线传输信道特性在一定时间范围内虽然随时间变化,但总体上表现为时间平稳性^[27]。

OFDM 中传输比特的分配与信道特性直接关联。如果在动态比特分配中考虑信道平稳这一因素,新信道特性下的比特分配充分利用原信道的比特分配结果则会大大减少计算量,这对减少高速 OFDM 系统的处理时间、提高系统的整体性能是非常重要的。

本文基于电力线信道特性的相对时间平稳性,提出一种新的动态比特分配算法—非迭代比特分配算法,根据信道的变化在原有的比特分配结果基础上计算新的比特分配方案,计算复杂度明显降低,且前次的误差不会向后传递,具有收敛性。

2 平稳信道 OFDM 传输动态比特分配

2.1 OFDM 信道比特分配与规整

将信道划分为 N 个子信道,第 n 个子信道 ($n=0,1,\dots,N$) 的中心频率为 f_n ,它的噪声功率为 s_n^2 ,信道增益为 $|H(f_n)|$,所占用的功率为 e_n ,相应的比特率为 b_n 。那么根据传统注水法理论,整个信道的数据传输率为^[15]

$$R = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{|H(f_n)|^2 e_n}{G s_n^2} \right) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2 (1 + e_n g_n) \quad (1)$$

($n=1,2,\dots,N$ 且 $e_n > 0$)

其中

$$G = \frac{2^{2C} - 1}{2^{2R} - 1} = \frac{S/N}{2^{2R} - 1} \quad (2)$$

$$g_n = |H(f_n)|^2 / G s_n^2 \quad (3)$$

式(2)中 C 为信道容量。根据香农公式有 $C = \frac{1}{2} \log_2 (1 + S/N)$, C 即为(1)中所示实际数据传输率。

如果已知信道的噪声功率谱和信道传递函数

$H(f)$, 传统注水法即可给出子信道功率分配和比特分配方案,其中某些子信道可能不传送数据即比特数为 0。

式(1)得到的子信道比特率是小数,但实际通信系统必然传送整数比特。因此需要对传统注水法的结果进行规整。

记第 n 个子信道传输 b_n (b_n 为整数) 个比特所需能量为 $e_n(b_n)$ 。定义第 n 个子信道在当前状态下少分配 1 个比特,系统节约的能量为 $e_n(b_n)$, 即有

$$e_n(b_n) = e_n(b_n) - e_n(b_n - 1) \quad (4)$$

同理,定义第 k 个子信道在当前状态下多传 1 个比特,系统增加的能量为

$$e_k(b_k + 1) = e_k(b_k + 1) - e_k(b_k) \quad (5)$$

若 $e_k(b_k + 1) < e_n(b_n)$, 则意味着第 k 个子信道多传 1 个比特,第 n 个子信道少传 1 个比特(称之为子信道间“比特交换”)后,系统能量减小但总数据传输率不变。因此,调整后的系统效率更高。不断进行如此的比特交换过程,最终达到一种状态,满足^[19]

$$\max_{n=1,\dots,N} [e_n(b_n)] < \min_{m=1,\dots,N} [e_m(b_m + 1)] \quad (6)$$

那么保持总比特率恒定,在任意两个子信道间移动 1 个比特,系统所需总能量都会增加,因此当前分配方案是最优的。在式(6)准则下, Huges 提出了位添加法^[16], Sonalkar 等人提出了位去除法^[20]。两种算法的基本思想就是搜索各个子信道的 $e_n(b_n)$, 找到当前的极值再增/减比特。每增/减 1 个比特就要重新搜索一次子信道,效率比较低。

2.2 非迭代动态比特分配算法

本文的目标是找到最优离散比特分配方案的特点以便简化分配算法。

由单个子信道的注水法

$$b_n = \log_2 (1 + g_n e_n) \quad (7)$$

$$\text{即 } e_n(b_n) = (2^{b_n} - 1) / g_n \quad (8)$$

代入式(4)

$$e_n(b_n) = e_n(b_n) - e_n(b_n - 1) = 2^{b_n} / 2g_n \quad (9)$$

$$e_n(b_n) = 2^{b_n - 1} / g_n = 2e_n(b_n - 1) \quad (10)$$

从式(9)中解出 b_n

$$b_n = \log_2 g_n + \log_2 e_n(b_n) + 1 \quad (11)$$

若实际系统已达到最优比特分配,那么式(6)成立,从而必有

$$\max_{n=1,\dots,N} [e_n(b_n)] < \min_{n=1,\dots,N} [e_n(b_n + 1)] = 2e_n(b_n) \quad (12)$$

其中“=”用到了式(10)。

对 $e_n(b_n)$ 归一化,将所有子信道的 $e_n(b_n)$ 除以其

中的最小值, 得到

$$\hat{e}_n(b_n) = \frac{e_n(b_n)}{\min_{n=1..N}[e_n(b_n)]} \quad (13)$$

重写式(11)

$$b_n = \log_2 g_n + \log_2 \hat{e}_n(b_n) + k = \lfloor \log_2 g_n \rfloor + \log_2 \hat{e}_n(b_n) + k' \quad (14)$$

由式(12)可知, $1 \leq \hat{e}_n(b_n) < 2$, 其中 k 为常数, 对所有子信道一样。由式(12)可知 $1 \leq \hat{e}_n(b_n) < 2$, 因此 $0 \leq \log_2 \hat{e}_n(b_n) < 1$ 。式(14)表明, 各个子信道 b_n 的相对数量差异基本由 $\lfloor \log_2 g_n \rfloor$ 决定! 利用这一结论, 提出一种利用前次比特分配结果和当前信道特性的比特分配新算法。

设原信道及新信道的特性分别为 g_n 与 g'_n , 当前实际使用的子信道组成的集合为 I , 实际使用子信道数为 $N^* = \|I\|$, 提出算法的步骤为

- ① 计算 $\lfloor \log_2 g_n \rfloor$ 和 $\lfloor \log_2 g'_n \rfloor$;
- ② $\text{temp} = \left\lfloor \frac{\sum_{n=1}^N b_n - \sum_{n \in I} \lfloor \log_2 g_n \rfloor}{N^*} \right\rfloor$;
- ③ $b'_n = \text{temp} + \lfloor \log_2 g'_n \rfloor$ (15)

④ 按照式(6)的原则增/减比特直至达到能量限制或比特限制。

在①、②、③步算法中, 都是直接计算, 复杂度分别为 $2N$ 、 $2N$ 、 N 。若考虑到①步骤中可直接利用上次计算得出的 $\lfloor \log_2 g_n \rfloor$, 则复杂度为 N 。但在第4步中, 若按式(6)的原则简单搜索各个子信道 $e_n(b_n)$ 的极值再增/减比特, 则复杂度为 $\hat{B} \cdot N$ (\hat{B} 为还要增/减的比特数), 效率大为降低, 因此还需要改进。改进的基本思想是把各个子信道的 $e_n(b_n)$ 均匀量化为 $e_n(b_n)_Q$, 量化后的 $e_n(b_n)_Q$ 只能取有限个值, 组成量化值矢量, 设

$$e_Q = [e_1 \quad e_2 \quad \cdots \quad e_K] \quad (16)$$

其中, K 为量化等级数。按量化值把子信道分为若干个集合, 每个集合内的子信道统一增/减比特。将式(9)代入式(15), 得到量化方案

$$e_n(b_n) = 2^{\text{temp}-1} \cdot 2^{\lfloor \log_2 g_n \rfloor} / g_n \quad (17)$$

显然 $2^{\text{temp}-2} \leq e_n(b_n) < 2^{\text{temp}-1}$, 于是在此范围内均匀量化 $e_n(b_n)$ 为 $e_n(b_n)_Q$ 。设定量化级数为 $K=N/4$, 量化值矢量

$$e_Q = \begin{cases} 2^{\text{temp}-1} [1 + \frac{1}{K}, 1 + \frac{2}{K}, \dots, 2] & (18) \\ 2^{\text{temp}-2} [1, 1 + \frac{1}{K}, \dots, 1 + \frac{K-1}{K}] & (19) \end{cases}$$

若系统在第④步需要增加比特, 则采用式(18), 反之用式(19)。各个等级的子信道集合为定义为 F_1 、 F_2 、 \cdots 、 F_K , 元素个数分别为 $\|F_1\|$ 、 $\|F_2\|$ 、 \cdots 、 $\|F_K\|$ 。这些集合中目前加载的比特数大于等于0的子信道又组成一个集合组, 定义为 F'_1 、 F'_2 、 \cdots 、 F'_K , 元素个数分别为 $\|F'_1\|$ 、 $\|F'_2\|$ 、 \cdots 、 $\|F'_K\|$ 。从上两式可以看到, $e_n(b_n)$ 量化后的误差小于 $2^{\text{temp}-2} / K$ 。

以增加比特为例, 下面分别给出 ET 和 BT 条件下的算法。设当前系统使用的总能量为 E_{now} , 令 $i=1$, 第④步 ET 条件下算法如下:

① 若 $E_{\text{now}} + \|F_i\| \cdot e_Q(i) < P_s$, 则 F'_i 中所有子信道比特数加1, 且 $E_{\text{now}} = E_{\text{now}} + \|F'_i\| \cdot e_j(i)$; 反之到③;

② $i=i+1$, 回①;

③ 计算 $l = \lfloor (P_s - E_{\text{now}}) / e_i \rfloor$, 在 F'_i 中任选 l 个子信道增加1个比特。

如果系统是 BT 条件, 则设定当前系统比率为 B_{now} , 要求的比率为 B_t

① 若 $B_{\text{now}} < B_t$ 且 $B_{\text{now}} + \|F_i\| < B_t$, 则 F'_i 中所有子信道比特数加1, 更新 $B_{\text{now}} = B_{\text{now}} + \|F_i\|$; 反之到③;

② $i=i+1$, 回①;

③ 计算 $l = B_t - B_{\text{now}}$, 在 F'_i 中任选 l 个子信道增加1个比特。

以上给出的是第④步中需要增加比特情况下的算法, 如果是需要减少比特, 可以类似给出, 此处不再赘述。

3 非迭代动态比特分配算法的仿真验证

图1给出了一组连续测量的电力线传输衰减特性曲线(50kHz-500kHz, 已归一化), 每间隔五分钟测量一次, 共9组数据。数据的统计分析表明^[27]该组信道传输特性具有(时间)平稳性。图2为相同时段测得的电力线噪声功率谱特性。为简化问题, 这里仅给出一次测量结果。

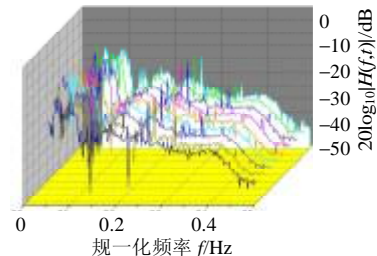


图1 连续测量的电力线传输衰减特性

Fig. 1 Transfer character of continuous measured PLC

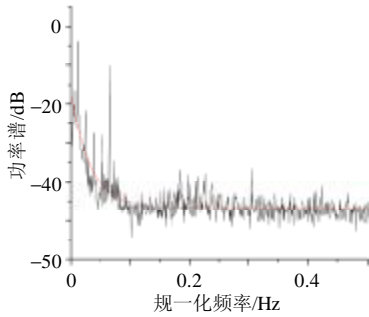


图 2 电力线噪声功率谱特性
Fig. 2 Power spectrum of noise in PLC channel

为验证算法，将信道划分为 128 个子信道，对第 1 组数据采用位添加法得到初始比特分配方案，然后采用本文算法，依次对第 2、3、……9 组数据进行比特加载。由此得到的第 9 组数据的比特分配如图 3，直接利用位添加法得到的第 9 组数据比特加载方案如图 4。

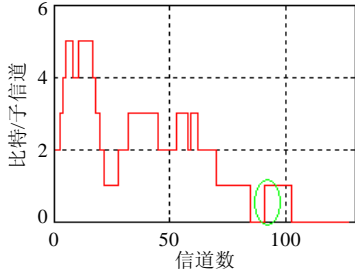


图 3 本文算法比特分配结果 (N=128)
Fig. 3 Bit-loading result from the proposed algorithm

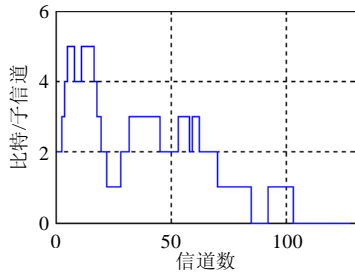


图 4 位添加法比特分配结果 (N=128)
Fig. 4 Bit-loading result from the Huges' algorithm

比较图 3 与图 4 的比特分配结果，可以看出本文提出的分配算法与位添加法的最优结果差别很小（仅 1 个比特，如图中椭圆所示，占总比特的 0.45%），但计算所需的时间从 0.047s 下降为 0.016s，减少了 66%。表 1 将信道分别划分为 128 和 1024 个子信道的对比结果。

需要特别指出的是，表 1 中列出的子信道数在 N=128、1024 时一次加载总比特数不同，但实际系统的数据传输率及信道容量根据香农公式不会因此改变！这是因为，为了保证 OFDM 系统中各个子信道载波的正交性，相邻载波间频率差必须满足

$$\Delta f \geq 1/T \tag{20}$$

其中， T 是一个 OFDM 符号的周期时间。当子信道数由 128 增大为 1024 时，变大了 8 倍，因此新的 $\Delta f' = \Delta f / 8$ ，故 $T' = 8T$ 而数据传输率为一次加载比特数除以 OFDM 符号的时间。从表 1 中容易看出，在 N=128、1024 时，一次加载的比特数刚好有 8 倍的关系，除以时间后实际系统的数据传输率不变！

从表 1 的结果可以看出本文算法得到的比特分配方案不会因前次的误差而导致累积发散，具有良好的收敛性和有效性。但在时间上，随着子信道的增多，本文算法所需时间由位添加法的 1/3 降为 1/14！

表 1 两种算法对各组信道比特分配的结果
Tab.1 The bit-loading results from two algorithms

序号	N=128		N=1024	
	本文算法	位添加法	本文算法	位添加法
1	-	233	-	1859
2	246	245	1960	1960
3	240	240	1916	1916
4	245	244	1950	1949
5	242	241	1926	1926
6	250	249	1989	1988
7	253	252	2015	2015
8	217	216	1727	1728
9	220	219	1752	1752
总计时间/s	0.016	0.047	0.078	1.10

4 算法复杂度与性能分析

第 3 部分已经指出算法的前 3 步复杂度为 $4N$ 。第 4 步，首先要将 $e_n(b_n)$ 量化，对每个子信道需要两次计算，一次是计算 $e_n(b_n)$ 精确值，另一次则是确定量化等级，复杂度为 $2N$ 。①与②是迭代算法，迭代次数最多不超过 K 次。每次迭代需一次乘法和一次加法和一次比较，因此复杂度小于等于 $3K = 3N/4 < N$ 。③中任选 l 个子信道，复杂度为 l 。综上，本文算法的复杂度为 $6N + 3K + l < 8N$ 。

文献[23]中算法则是针对 BT 的条件，复杂度大于 $10N$ 。文献[17]中的 BT 算法复杂度为 $O(C_M \times N + 2N)$ 其中 C_M 为设定的最大迭代次数，一般取 10，所以复杂度一般为 $12N$ 。文献[22]中的算法复杂度是 $O(I \log_2 B + N \log_2 N)$ ；文献[21]中的算法复杂度为 $O(I \cdot B + N \log_2 N)$ 。其中 B 为分配的总比特数， I 是每个子信道最多能分配的比特数。文献[24]类似文献[17]提出了一个迭代搜索算法。它先设定一个误差值，据此迭代搜索出非整数加载方案，在此基础上再次迭代搜索出整数加载方案。复

杂度与文献[17]类似。文献[18]提出了一种在最小误码率线之下的非迭代加载算法。它先算出比特分配在此基础上确定子信道能量分配,复杂度比文献[23]略高。文献[26]提出了一种在误比特率限制下的比特交换及能量分配调整算法,它适应于信道缓慢变化的情况。但它需要寻找适于交换的子信道从而大大降低了算法速度,且不一定得到最优结果。

本文提出的算法为线性复杂度,计算量低于文献[17]和文献[23]的算法,更明显低于文献[21]和文献[22]的对数复杂度的计算量,且不论 ET 或 BT 条件均适用。

需要指出的是,上述所有文献的算除位添加法^[16]和位去除法^[20]均只能求出次优解,且除文献[23]外,性能损失均难以直接估计。文献[16]与文献[20]算法也因耗时过长,没有成为国际通用标准算法。其余算法均利用微量的性能损失换取算法速度。文献[23]中给出的性能损失为

$$E_{\text{lossmax}} \leq 10 \log_{10}(1 + 2^{-l}) \quad (21)$$

式中 l 为量化等级数。

本文算法第 4 步采取了量化估值等措施,也会导致微量的性能损失,即会有极少数子信道或多或少分配一个比特。仿真对比结果已说明这点。设这部分子信道个数为 m ,它们增加一个比特所需能量总和的最小值为 $E_{\text{remain}} = m \cdot 2^{\text{temp}-2}$,而由量化导致的能量计算累计误差

$$E_{\text{loss}} < 2^{\text{temp}-2} / K \cdot \hat{B} < 2^{\text{temp}-2} / K \cdot N \quad (22)$$

\hat{B} 为算法第 4 步中的还需增/减的比特数。那么必有

$$E_{\text{remain}} < 2^{\text{temp}-2} / K \cdot N \quad (23)$$

于是得到

$$m < \lfloor N / K \rfloor = 4 \quad (24)$$

这是在最坏的情况下得到的结果,实际情况一般会小于这个值。也就是说,在实际使用中,加载结果与最优结果相差不会超过 4 个比特,仿真结果完全符合这一点。由此说明本算法完全具备与目前使用算法竞争的性能,且速度更快。

5 结论

电力线信道呈现时域平稳的特性,可以充分利用这个特点改进电力线 OFDM 系统的动态比特分配算法。本文在总结分析最优比特分配原则的基础上,提出根据信道的变化在原有的比特分配结果基础上计算新的比特分配方案,比已有的同类典型算法在速度方面有显著的提高。经过实测数据的仿真

验证,证明了本算法的正确性和有效性。本文算法也适用于其它时域平稳信道的动态比特分配。

致谢

在本文的研究中,同组的同事提供了部分参考文献,特此一并致谢。

参考文献

- [1] Kalet I. The multitone channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(2): 119-124.
- [2] Bingham JAC. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come[J]. IEEE Communication Magazine, 1990, 28(5): 5-14.
- [3] ESTI, Broadband Radio Access Networks; High Performance Radio Local Area Network, Type 2; Physical Layer[EB/OL]. ETSI TS 101 475, V1.3.1, 2001, <http://pda.etsi.org/pda/Aquery.asp>.
- [4] Chow PS, Tu JC, Cioffi John M. A discrete multitone transceiver system for HDSL applications[J]. IEEE Journal of Selected Areas of Communications 1991, 9(6): 895-908.
- [5] Manfred Zimmermann, Klaus Dostert. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-Band power line communications [J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat, 2002, 44(2): 249-258.
- [6] Olaf G Hooijen. A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium[J]. IEEE Trans. Electromagn. Compat., 1998, 40(11): 331-336.
- [7] 姜霞, J N Guimbis, 程时杰. 低压配电网载波通信噪声特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 30-35.
Jiang Xia, J N GUIMBIS, Cheng Shijie. Noise characteristics investigation in low voltage powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 30-35.
- [8] Manfred Zimmermann, Klaus Dostert. A multipath model for the powerline channel[J]. IEEE Trans. Communications, 2002, 50(4): 553-559.
- [9] 何海波, 姜霞, 程时杰, 等. 一种低压配电网载波通信信号分析的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 66-71.
He Haibo, Jiang Xia, Cheng Shijie *et al.* A novel scheme for low voltage power line communication signal processing[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 66-71.
- [10] 张保会, 刘海涛, 陈长德. 电话、电脑、电视和电力网“四网合一”的概念与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2001; 21(2): 60-65.
Zhang Baohui, Liu Haitao, Chen Changde. Concept and key techniques of using power transmission line as common platform for telephone, computer, television and power transmission networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2001; 21(2): 60-65.
- [11] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 16-19.
Sun Junping, Sheng Wanxing, Wang Sunan. Study on the new substation network communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 16-19.
- [12] 罗春风, 程时杰, 熊兰, 等. 基于多层感知器的低压电力线时变信道非线性均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 71-75.
Luo Chunfeng, Cheng Shijie, Xiong Lan *et al.* A nonlinear equalization method based on multilayer perceptron for ofdm powerline communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 71-75.
- [13] 郭静波, 王赞基. 低压配电网扩频信号传输特性及通信系统实现对策[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 78-82.

- Guo Jingbo, Wang Zanji. Spread spectrum signal transmission over low voltage distribution networks and realization countermeasures of the communication system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 78-82.
- [14] 郭静波, John M. Cioffi. 配电网多用户通信中的动态频谱管理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 7-11.
- Guo Jingbo, John M. Cioffi. Dynamic spectrum management of multi-user communication over power distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 7-11.
- [15] Haykin S, Communication Systems[M]. New York: John Wiley&Sons, 2001.
- [16] HugesHartogs D. Emsemble Modem structure for Imperfect Transmission Media[P]. U. S. Patents, 4, 679, 227 (July 1987), 4, 731, 816 (March 1988) and 4, 833, 706 (May 1989).
- [17] Chow P S, Cioffi John M, Bingham A C. Apractical discrete multi-tone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally channel[J]. IEEE Transaction on Communications, 1995, 43(2/3/4): 773-775.
- [18] A Czylwik. Adaptive OFDM for wideband radio channels [C]. Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conf (GLOBE COM'96), 1996, 713-718.
- [19] J. Campello. Optimal discrete bit loading for multicarrier modulation systems[C]. International Symposium on Information Theory, Cambridge, MA, USA, 1998, 193.
- [20] Sonalkar R V, Shively R R. An efficient bit-loading algorithm for DMT application[C]. Proc. IEEE Globecom, Sydney, Australia, 1998, (5): 2683-2688.
- [21] Lai S K, Cheng R S, Letaief K Ben *et al.* Adaptive trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission[C]. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC'99), Houston, Texas, 1999, 1: 290-294.
- [22] L. Piazzo. Fast algorithm for power and bit allocation in OFDM system[J]. Electronic Letters 1999, 35(25): 2173-2174.
- [23] J. Campello. Practical bit loading for DMT[C]. International Conference on Communications, 1999, 2: 801-805.
- [24] Enzo Baccarelli, Antonio Fasano. Novel efficient bit-loading algorithms for peak-energy-limited ADSL-type multicarrier systems [J]. IEEE Trans. Signal Processing 2002, 50(5): 1237-1247.
- [25] M Zwingelstein, M Gazalet, M Gharbi. Non-iterative bit-loading algorithm for ADSL-Type DMT applications[J]. IEE Proc. Commun. 2003, 150(6): 414-418.
- [26] Tsai Shangho, Lin Yuanpei, Jay Kuo C C. Combined bit swap and power gain adaptation for error rate equalization in DMT systems [C]. ICASSP 2004, Montred Quebec, Canada, IV: 1065-1068.
- [27] Guo Jingbo, Wang Zanji, Lv Haifeng *et al.* Transmission characteristics of low voltage distribution networks in china and its model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1341-1348.

收稿日期: 2005-05-25。

作者简介:

唐博进 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信;

郭静波 (1960-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统通信、通信与信号处理、电路与系统理论等。