

OFDM系统的子信道比特快速自适应分配算法

任天鹏<sup>1,2</sup>, 张尔扬<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 通过对 OFDM 的子信道比特分配空间进行分析, 本文提出着眼于误比特率梯度的动态 LMS 算法和全局优化算法。全局优化算法是基于混合遗传算法思想。相对 Hughes-Hartogs 算法, 两种算法计算量大幅下降, 并且具有递推性。仿真结果表明, 快衰落信道下动态 LMS 算法接近理想性能; 慢衰落信道下动态 LMS 算法和全局优化算法结合应用, 可以接近理想性能。

关键词: OFDM 系统; 子信道比特分配; 动态 LMS 算法; 混合遗传算法

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)05-0068-03

OFDM 技术优势之一是可以通过自适应调整各个子信道上比特分配, 充分提高频谱利用率。目前, 学者研究了大量 OFDM 自适应调制的比特分配算法<sup>[1-6]</sup>。其中, Hughes-Hartogs 算法基于 Greedy 思想, 性能最为优越, 但需要进行大量的排序和搜索操作, 复杂度高<sup>[4]</sup>。其他算法通常事先对子信道比特速率或信噪比(SNR)进行量化, 对于比特速率固定情况, 还需要加载比特速率调整算法。

### 1 问题及优化空间分析

假设 OFDM 系统比特传输速率  $R$  恒定、总发射功率  $S$  恒定; 子信道集合为  $C = \{1, 2, \dots, N\}$ , 子信道调制星座点的比特数集合为  $Q = \{Q_1, \dots, Q_M\} = \{1, \dots, M\}$ 。系统误比特率为  $P_e = \sum_{i=0}^{N-1} R_i P_{e_{iR_i}} / R$ 。

由于  $Q$  受星座点数限制,  $Q_i$  相差不大, 系统误比特率可以近似表示为  $P_e = \sum_{i=0}^{N-1} P_{e_{iR_i}} / N$ 。

因此, OFDM 系统在一定功率和比特速率下, 以误比特率最低为目标的子信道比特分配优化问题可以表示为  $\min(P_{e_{eq}} = \sum_{i=0}^{N-1} P_{e_{iR_i}})$ , s. t  $\sum_{i=0}^{N-1} R_i \equiv R, R_i \in Q$ 。

很明显, 问题的无约束空间是一个  $N$  维碗状空间。在比特速率固定约束下, 问题空间是无约束空间中一个完全图。图的顶点仅由满足约束的点组成。于是, 问题空间将变得复杂化, 极点和驻点数目未知。

首先引入误比特率梯度概念(如图 1 所示):  $\Delta P_{e_{dR_i}}$  和  $\Delta P_{e_{uR_i}}$  分别为误比特率下、上梯度, 即一定 SNR 下某子信道星座点比特数量减少或增加 1 bit 时误比特率减少或增加值。

误比特率梯度可以由信道估计得到, 也可以由系统误比特率得到。

### 2 算法描述及评估仿真

#### 2.1 动态 LMS 算法

动态 LMS 算法的主要思想建立在未优化时, 误比特率大的状

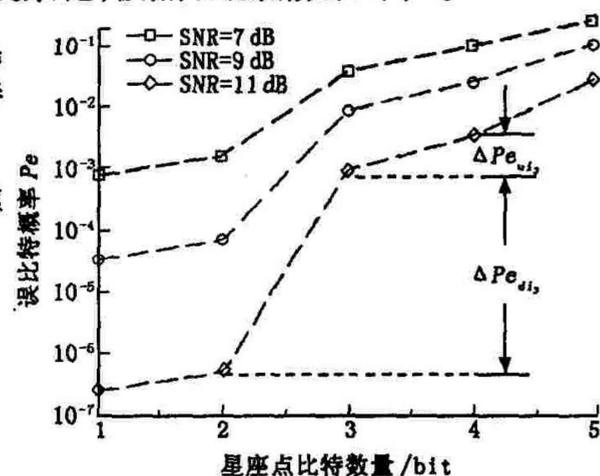


图 1 误比特率梯度图

收稿日期: 2006-03-24

作者简介: 任天鹏(1982-), 男, 河南南阳人, 硕士生, 主要从事 OFDM 通信系统研究;

张尔扬(1941-), 男, 浙江宁波人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间高速数传、无线通信及抗干扰等研究。

态点下梯度通常大于误比特率小的状态点上梯度的认识上。相对 Hughes - Hartogs 算法,正是这个认识使得动态 LMS 算法复杂度大幅度降低。因此每次迭代时,通过改变子信道信息比特数目,在对总误比特率的贡献上,以误比特率大的状态点下梯度置换误比特率小的状态点上梯度。其变换过程如下:

- 1) 初始化:随机设置  $R_i$ ,使得  $\sum_{i=0}^{N-1} R_i \equiv R$ ,  $R_i \in Q$ 。
- 2) 对序列  $\{Pe_{iR_i}\}$  进行排序。
- 3) 迭代分配:①  $Pe_{mj} = \max(Pe_{iR_i})Pe_{nk} = \min(Pe_{iR_i})$ , 计算  $\Delta Pe_{dmj}, \Delta Pe_{unk}$ 。  
 if  $j = 1$   
 if  $Pe_{mj} < Pe_{max}$   
 $Pe_{mj} = 0$ , return to 2);  $m$  子信道无法进一步调整。  
 else  $N = N - 1$ , return to 1);  $m$  子信道无比特率超过  $Pe_{max}$ , 无法使用。  
 end  
 elseif  $\Delta Pe_{unk} > \Delta Pe_{dmj}$ , return to 4); else  $R_m = R_m - 1, R_n = R_n - 1$ ;  
 end

得到  $R_m, R_n$  调整后的  $Pe_{mR_m}, Pe_{nR_n}$ , 并调整其在序列  $\{Pe_{iR_i}\}$  中的位置;

② Return to ①。

- 4) 优化完毕,结束迭代。

### 2.2 全局优化算法

动态 LMS 算法是子信道单比特优化;而且只是  $N$  维空间中动态 2 维空间的优化,属于局部优化。但是,搜索空间为完全图,可以基于遗传算法,实现多个子信道多比特全局优化。

由于搜索空间在其无约束空间中不连续,简单 GA 的搜索方向效果不佳;引入针对问题空间等专门知识,有助于引导 GA 搜索。因此我们基于混合遗传算法,提出如下全局优化算法:

- 1) 初始化:随机设置  $R_i$ ,使得  $\sum_{i=0}^{N-1} R_i \equiv R, R_i \in Q$ 。
- 2) 对序列  $\{Pe_{iR_i}\}$  进行排序。
- 3) 基于混合遗传算法的优化迭代,其中群体为  $G = G_d + G_u$ , 规模为  $G_N$ ; 最大迭代数为  $I_N, I_n = 0$ ; 评价函数为  $f(G) = \min(\sum_{i=0}^{G_N-1} Pe_{iR_i})$ 。① 建立群体:  $G_d$  取自  $Pe_{iR_i}$  较大的子信道,  $G_u$  取自  $Pe_{iR_i}$  较小的子信道;两者规模可以相等,也可以不相等;② 随机生成群体中个体的  $R_i$ , 调整量集合  $\Delta R_d \subset Z^+ \cup 0, \Delta R_u \subset Z^- \cup 0$ , 并满足  $\sum_{i=0}^{G_N-1} \Delta R_i = 0, R_i \in Q$ , 得到初步新群体  $G' = G'_d + G'_u$ ;③ 依据评价函数,选择  $G, G'$  中较优者,作为新群体;④ 将新群体的  $Pe_{iR_i}$  插入序列  $\{Pe_{iR_i}\}$  中;⑤ 令  $I_n = I_n + 1$ , 如果  $I_n > I_N$ , 则转 4), 否则回到 ①。
- 4) 优化完毕,结束迭代。

在 3) - ③ 中,评价函数的计算也可以表示为状态点误比特率上、下梯度差:  $g(G) = \sum_{G_d} \Delta Pe_{diR_i} - \sum_{G_u} \Delta Pe_{uiR_i}$ 。  $g(G)$  大于 0 时认为  $G'$  较优,  $g(G)$  小于 0 时认为  $G$  较优。在迭代中,如果连续判定  $G$  较优,则可以提前结束迭代。

### 2.3 复杂度分析

假设待分配总比特数为  $n$ , 子信道数为  $N$ , Hughes - Hartogs 算法计算量为  $O(n^4)^{[4]}$ 。动态 LMS 算法在每次迭代仅对被调整的子信道进行误比特率剃度计算和误比特率插队排序,计算量为  $O(n^2)M$ ; 动态 LMS 算法和全局优化算法结合的计算量为  $O(n^2)(M + G_N I_n)$ 。  $M$  是动态 LMS 算法的迭代次数,容易证明:初始状态为比特平均分配时,  $\max(M) = 0.5n$ ;  $I_n$  是全局优化算法迭代次数,通常取 50 - 100。

仿真证明,  $M$  通常远小于  $0.5n$ 。假设 OFDM 系统中,子信道数目  $N = 128$ , 待分配总比特数目为  $n = 3N$ , 则在 100 次仿真中,不同衰落信道下  $M$  的分布如图 2 所示。

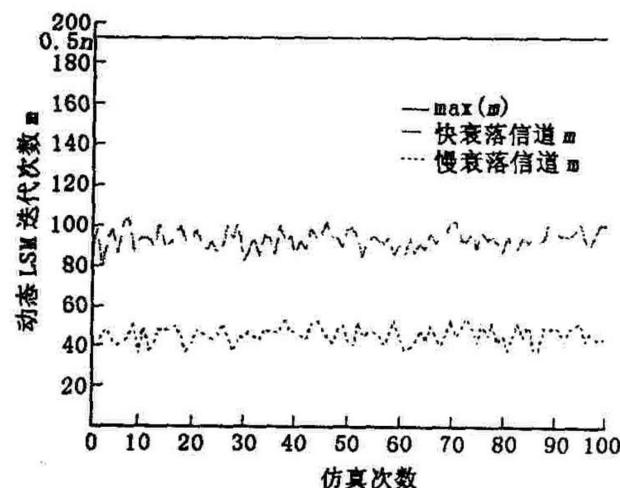


图 2 动态 LSM 算法迭代次数  $M$  分布图

可以知道,本文提出的两种自适应调制算法复杂度和信道状况有关;但是很显然,无论信道状况如何,这两种算法的复杂度都大大低于 Hughes - Hartogs 算法。

## 2.4 性能仿真

Hughes - Hartogs 算法基于 Greedy 算法思想,其优化性能代表比特分配的理想性能。在 OFDM 系统中,子信道数目  $N = 128$ ,待分配总比特数目为  $n = 3N$ ;星座映射方式为 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、32QAM,子信道信息比特数量集合为  $Q = \{Q_1, \dots, Q_M\} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 。分别利用等比特分配算法、动态 LMS 算法、全局优化算法、Hughes - Hartogs 算法进行子信道比特分配。不同信道衰落下误比特率函数曲线如图 3-4 所示。

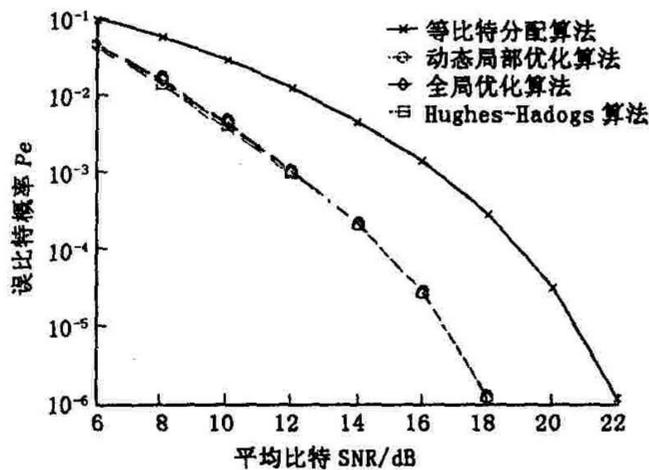


图3 快衰落信道中误比特率分布图

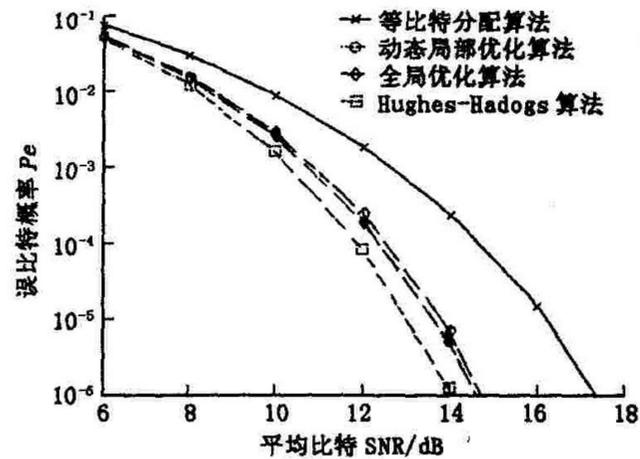


图4 慢衰落信道中误比特率分布图

## 3 结论

根据仿真可知,快衰落信道下动态 LMS 算法性能接近理想性能;慢衰落信道下动态 LMS 算法和全局优化算法结合应用,可以接近理想性能。

同时,动态 LMS 算法和全局优化算法优化过程中,子信道状态一直位于完全图中,以比特调整代替了比特分配。当部分子信道状况发生变化时,经过简单迭代,可以直接由当前状态转移至目标状态,具有递推性,更适用于变参信道。对两种算法稍加改造,就可应用于变比特速率系统中。优良的性能和较低的复杂性保证了动态 LMS 算法和全局优化算法在 OFDM 系统中子信道比特分配中的实时性和有效性。

### 参考文献:

- [1] Czylik A. Adaptive OFDM for Wideband Radio Channels[A]. Proc. IEEE Global Telecommunications Conf[C]. London: 1996,713 - 718.
- [2] Webb W T, Steele R. Variable Rate QAM for Mobile radio[J]. IEEE Trans, On Commun, 1995,43(7):2223 - 2230.
- [3] Lai S K, Cheng R S, Letaief K B, et al. Adaptive Trellis Coded MQAM and Power Optimization for OFDM Transmission. Proc [A]. IEEE Vehicular Technology Conf(VTC99)[C]. Houston:1999,290 - 295.
- [4] D Hughes - Hartogs. Ensemble Modem Structure for Imperfect Transmission Media[P]. U. S. Patents:4679227,1987 - 07.
- [5] Chow P S, Cioffi J M, Bingham J A C. A Practical Discrete Multitone Transceiver Loading Algorithm for Data Transmission over Spectrally Shaped Channels[J]. IEEE Trans On Comm, 1995, 43(2/3/4):773 - 775.
- [6] Khun H W. The Hungarian Method for the Assignment Problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1955, 2(1):83 - 97.

(编辑:门向生)

(下转第73页)