

# 一种 OFDM 系统中的快速位加载算法

朱小鹏, 李宏伟, 蒋 莉

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**提出了一种单用户 OFDM 系统中的自适应比特分配技术。在目标 BER 要求的前提下, 采用两步比特分配算法为每个子载波分配相应的比特数, 最终使发射功率最小。仿真结果表明: 该算法的性能接近最优算法, 较传统的算法性能有较大的提升, 而算法复杂度大大降低。

**关键词:**正交频分复用; 比特分配; 信道增益; 平均比特信噪比

**中图分类号:** TN911.25   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1009-3516(2007)04-0062-03

近年来, 正交频分复用(OFDM)技术成为无线通信领域的研究热点之一。传统 OFDM 系统的子载波采用同一种调制方式, 系统性能主要取决于信道增益最差的子载波。在 OFDM 系统中采用自适应技术, 根据各子信道的增益在子载波上进行自适应的比特加载和发射功率分配, 可以减小发射功率或提高数据速率, 有效的提高系统性能<sup>[1-3]</sup>。“注水”算法可以使系统在给定发射功率的条件下使信道容量最大化<sup>[4]</sup>。但“注水”算法要求星座规模具有无限小的信息粒度, 实现相当困难。贪婪算法实现了系统传输特定数量的整数比特所需的功率最小化, 为一种最优算法<sup>[5-6]</sup>, 但它需要复杂的排序和搜索过程。Krongold<sup>[7]</sup>等人用迭代方法进行比特和功率分配, 但没有给出最优解的下界。而任天鹏<sup>[8]</sup>提出着眼于误比特率概率梯度的动态 LMS 算法和全局优化算法, 提高系统的频谱效率。本文在给定传输速率的前提下, 采用两步分配方法, 给出了一种简化的位加载算法, 目标是 minimized 发射功率。

## 1 系统模型

OFDM 系统的自适应分配原理框图如图 1 所示, 由自适应比特和功率分配算法对并行的二进制信息比特流进行比特和功率分配。在每个 OFDM 符号周期内, 由调制器得到  $N$  个频域信号, 经过 IFFT 和添加循环前缀后, 得到时域信号。

假设发射机通过信道估计能获得即时的子载波完整的信道信息。为方便讨论, 假设加性高斯的噪声, 其单边功率谱密度为  $N_0$ , 发射端的固定传输数据速率为  $B_{total}$ , OFDM 符号每个子载波上分配的比特数为  $R$ /OFDM 符号, 且可传输的最大比特数为  $R_{max}$ /OFDM 符号, 因此有  $0 \leq R \leq R_{max}$ 。平均每个子载波上传输的比特数为:  $\bar{R} = B_{total}/N$ 。上述比特数都为整数。

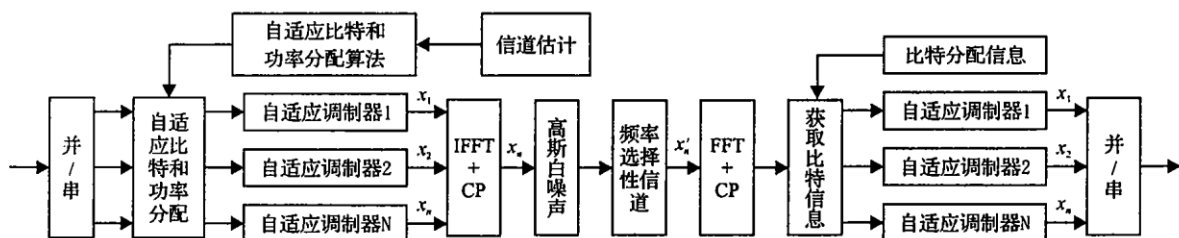


图1 OFDM 系统框图

在频率选择性信道中, 不同的子载波将经历不同的信道衰落, 也就具有不同的信道增益。下文中我们定

收稿日期: 2007-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60672032)

作者简介: 朱小鹏(1982-), 男, 江苏镇江人, 硕士生, 主要从事通信号处理和 DSP 应用技术研究。

义子载波的信道增益为  $H_i^2$  ( $i$  为子载波的序号),  $f_i(R_i)$  为第  $i$  个子载波在信道增益为 1。且在一个 OFDM 符号周期内满足目标误比特率 (BER) 要求时, 接收  $R_i$  个比特所需要的接收功率, 此时发射端子载波  $i$  的发射功率可表示为

$$P_i = \frac{f_i(R_i)}{H_i^2} \quad (1)$$

其中  $f_i(R_i)$  由目标 BER 所选的调制方式和编码方式决定, 且满足 2 个条件: ①  $f_i(0) = 0$ 。即接收 0 比特时, 需要的功率为 0; ②  $f_i(R_i)$  是下凸单调增函数。若在所有的子载波上都采用相同的调制方式和 BER 要求,  $f_i(R_i)$  可简化为  $f(R_i)$ 。对用格雷码映射的 M-QAM 调制,  $f(R_i)$  可表示为

$$f(R_i) = \frac{N_0}{3} \left[ Q^{-1} \left( \frac{B_0 R_i}{4} \right) \right]^2 (2^{R_i} - 1) \quad (2)$$

其中  $B_0$  为目标 BER,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 。

对于固定速率的传输系统, 在保证可靠传输, 满足 BER 要求的前提下, 使发射功率最小的最优化问题可表示为

$$\min P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{f(R_i)}{H_i^2} \quad (3)$$

约束条件为:  $B_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N R_i$  且  $0 \leq R_i \leq R_{\text{max}}$ 。

## 2 比特分配算法

在单用户 OFDM 系统中, 根据各子载波的信道情况为每个子载波分配不同数量的比特并采用相应的调制方式, 最后根据式(1)和(2)分配相应的功率。

由式(3)可得

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^N \frac{f(R_i)}{H_i^2} \geq \left( \prod_{i=1}^N \frac{f(R_i)}{H_i^2} \right)^{1/N} \quad (4)$$

当  $\frac{f(R_1)}{H_1^2} = \frac{f(R_2)}{H_2^2} = \dots = \frac{f(R_N)}{H_N^2}$  时, 式(3)右边的等号成立,  $P_{\text{total}}$  取得最小值。

若假设所有的子载波上都具有相同的信道增益  $\bar{H}^2$  并传输相同数量的比特数  $\bar{R}$  则有

$$\frac{f(R_1)}{H_1^2} = \frac{f(R_2)}{H_2^2} = \dots = \frac{f(R_N)}{H_N^2} = \frac{f(\bar{R})}{\bar{H}^2} \quad (5)$$

其中,  $\bar{H}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2$ ,  $\bar{R} = \frac{1}{N} B_{\text{total}}$ 。

此时发射功率的最小值为

$$P_{\text{min}} = \sum_{i=1}^N \frac{f(R_i)}{H_i^2} = N \frac{f(\bar{R})}{\bar{H}^2} \quad (6)$$

由以上各式分析得出一种两步比特分配算法。第一步: 在信道增益大于  $\bar{H}^2$  的子载波上可以预先分配  $\bar{R}$  比特, 然后采用类似贪婪算法的分配原则, 将剩余的比特分配完。第二步: 采用迭代比较的方法, 对各子载波上分配的比特进行调整, 最终达到发射功率最小化。下面具体讨论所提出的两步分配算法。

### 1) 初始分配

**步骤 1** 计算  $\bar{H}^2$  和  $\bar{R}$ , 并根据系统具体的调制方式设定比特分配步长为  $\Delta b$  比特 (本文中假设所有子载波上都采用 M-QAM 调制)。其中  $\Delta b$  为整数。

**步骤 2** 在所有子载波中查找信道增益大于等于  $\bar{H}^2$  的子载波, 并将这些子载波放于集合  $U$  中。

**步骤 3** 为集合  $U$  中的所有子载波分配  $\bar{R}$  比特, 对集合外的子载波不分配比特。

步骤4 对所有的子载波  $i=1,2,\dots,N$ , 计算在每个子载波上增加  $\Delta b$  所需要增加的发射功率  $\Delta P_i = (f(R_i + \Delta b) - f(R_i))/H_i^2$  并找出  $\min \Delta P_i$  所对应的子载波, 在该子载波上增加  $\Delta b$  比特。

步骤5 计算  $\bar{R} = \sum_{i=1}^N R_i$ 。若  $\bar{R} = B_{\text{total}}$  则分配结束; 若  $\bar{R} < B_{\text{total}}$  则转到步骤4 继续执行。

上述的第一步比特分配只是粗略的分配, 并不能达到使发射功率最小化的要求。为了能够达到最小的发射功率, 还需要对各子载波上的比特进行调整。

## 2) 比特调整

步骤1 对所有的子载波计算在每个子载波上增加  $\Delta b$  个比特所需要增加的发射功率:  $\Delta P_i^{\text{add}} = (f(R_i + \Delta b) - f(R_i))/H_i^2$  和减少  $\Delta b$  个比特所能减少的发射功率:  $\Delta P_i^{\text{minu}} = (f(R_i) - f(R_i - \Delta b))/H_i^2$ 。

步骤2 对所有的子载波找出  $\min \Delta P_i^{\text{add}}$  和  $\max \Delta P_i^{\text{minu}}$  所对应的子载波序号  $m$  和  $n$ 。

步骤3 若  $\min \Delta P_i^{\text{add}} < \max \Delta P_i^{\text{minu}}$ , 则  $R_m = R_m + \Delta b$ ,  $R_n = R_n - \Delta b$ , 否则调整完成。

步骤4 计算  $\Delta P_m^{\text{add}} = (f(R_m + \Delta b) - f(R_m))/H_m^2$  和  $\Delta P_n^{\text{minu}} = (f(R_n) - f(R_n - \Delta b))/H_n^2$  然后转到步骤2。

完成上述两步分配后, 所得到的  $R_i$  就是所有子载波上最终的比特数。最后在根据式(1)分配各子载波上的功率, 实现最小的发射功率。

## 3 仿真结果及分析

本文采用的频率选择性瑞利衰落无线信道用6抽头延迟线性系统来实现, 功率延迟谱假设为指数衰减。OFDM 系统子载波数  $N=64$ , 每个子载波上都采用 M-QAM 调制,  $\Delta b=2$ , 每个子载波上最大可传输的比特数  $R_{\text{max}}=8$  bit, 每个 OFDM 符号内传输的总比特数  $B_{\text{total}}=256$  bit 并假设噪声功率谱密度  $N_0=1$ 。进行1000次仿真取平均计算。

平均信噪比定义为每比特所需的发射功率与噪声功率谱密度  $N_0$  之比, 平均每比特所需的发射功率定义为:  $P_{\text{total}}/B_{\text{total}}$ 。仿真中分析了本文的算法、贪婪算法和传统的等比特算法。从仿真结果可以看出, 本文的算法在性能上逼近最优算法, 在相同的 BER 要求下, 本文算法较等比特算法所需的平均比特信噪比小 4 dB 左右。

图2给出了两种算法的总传输比特和乘法次数的关系图。结合图3可以看出: 在相同条件下, 本文算法所需的平均比特功率略有增加, 但计算量大大减少, 且随着传输比特数的增加, 计算复杂度改善的越明显。

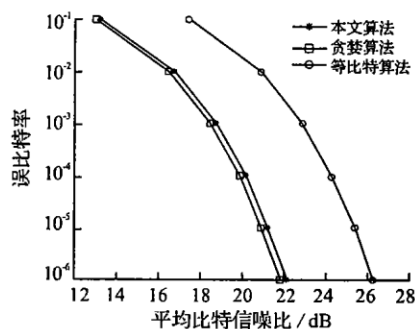


图2 不同算法的乘法次数比较

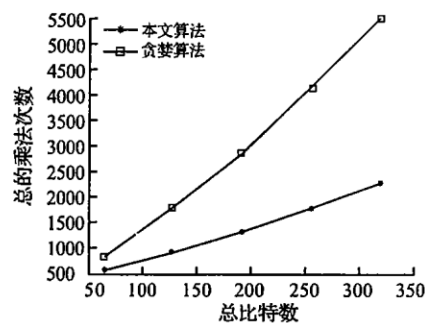


图3 不同算法的误比特率和平均信噪比关系曲线

## 4 结论

从以上分析得知: 本文所提出的算法除了获得了类似贪婪算法的最优性能外, 计算复杂度也大大小于贪婪算法, 且较传统的等比特分配算法有较大的性能提升, 在算法复杂度和性能之间取得了良好的折衷。在多用户 OFDM 系统中, 完成子载波分配后, 在各用户子载波上进行比特分配也可采用此简易算法, 能有效的提高系统性能。

(下转第 79 页)

[10] 张刚. 多指标约束下的满意容错控制研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

(编辑:姚树峰)

## Satisfactory Fault – tolerant Controller Design for Discrete Uncertain Systems with Constrains of Consistent Indices

HAN Xiao – dong, WANG Zhi – quan

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The problem of satisfactory fault – tolerant control system design for linear discrete uncertain systems against actuator failures with sector pole index, steady variance index and H – infinity constraints is addressed. A more practical and general model of actuator failures is adopted. Based on linear matrix inequality approach, the consistency theory on sector pole index, steady variance index and H – infinity constraints is set up, and the ranges of consistent indices are analyzed in details. Furthermore, the effective controller design method for systems with constraints of consistent indices is proved. Numerical examples are given to illustrate the validity of the design method.

**Key words:** fault – tolerant control; consistency theory; uncertain systems

(上接第64页)

### 参考文献:

- [1] Cryhvik. A Adaptive OFDM for wideSand radio channels[A]. In: II Proc of IEEE GLOBECOM 96 London IEEE[C]. London: 1996:713 – 718.
- [2] 柯峰,叶梧,冯穗力,等. 多用户 OFDM 系统中的快速自适应分配策略[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2005,33(3):40 – 43.
- [3] 何修富,郝坦锁,廖桂生. 未知多径信道下广义 OFDM 用户标识点选择[J]. 西北大学学报:自然科学版,2006,36(5):721 – 724.
- [4] Tu J C, Cioffi J M A. Loading Algorithm For the Concatenation of Coset Codes With Multichannel Modulation methods[A]. In: II Proceedings of IEEE GLOBECOM'90 San Diego IEEE[C]. San Diego:1990(1):183 – 1187.
- [5] Li Y, Su G. An Adaptive Modulation and Powerallocation Algorithm in OFDM system[A]. In II Proceedings of IEEE ICCAS 2004[C]. Chengdu :2004:339 – 343.
- [6] Hughes – Hartogs D. Ensemble Modem Structure For Imperfect Transmission Media US 4833706[P]. 1989 – 05 – 2323.
- [7] Krongold B S Ramchandran K, Jones D L. Computationally Efficient Optimal Power Allocation Algorithms For Multi – Carrier Communcation Systems[J]. IEEE Transactions on Communications,2000,48(1):23 – 27.
- [8] 任天鹏,张尔杨. OFDM 系统的子信道比特快速自适应分配算法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(5):68 – 70.

(编辑:田新华,徐楠楠)

## A New Bit Allocation Algorithm in OFDM System

ZHU Xiao – peng, LI Hong – wei, JIANG Li

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** A new adaptive bit and power allocation algorithm in single user OFDM system is proposed. At the request of object BER, the bit allocation algorithm is used in two steps to allocate appropriate bits to each subcarrier, finally the sum power is minimized. The simulation results shows that the performance of the proposed algorithm is approaching to that of the optimization method, and the complexity of the algorithm is greatly reduced.

**Key words:** OFDM; bit allocation; channel plus; average bit SNR