

一种基于最小误码率的OFDM自适应比特及功率分配算法

薛金银 焦秉立

(北京大学电子学系 北京 100871)

摘要 OFDM 自适应调制技术根据各子载波在频率选择性衰落信道中不同的瞬时增益, 动态地分配数据比特和发射功率, 可以优化系统性能, 提高频谱效率。该文主要研究 OFDM 系统发射功率和传输比特数不变时误码率最小化的自适应(MA)算法。提出一种以注水门限为迭代参数的 MA 算法, 并引入有记忆步长迭代法, 提高算法的稳定性。仿真结果表明, 与过去的算法相比, 该算法能以较低的复杂度获得更好的性能。

关键词 正交频分复用(OFDM), 自适应调制, 注水原理

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)07-1279-03

A Minimum Bit Error Rate Loading Algorithm for OFDM Systems

Xue Jin-yin Jiao Bing-li

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract An efficient power and bit allocation algorithm is proposed for wireless OFDM systems aiming at minimization of the bit error rate under the constraint of total transmit power and data rate. The algorithm is based on the water-filling approach and adopts a new iterative method to improve its stability. Simulation results show the proposed algorithm has a better performance and a lower computational complexity compared to the previous ones.

Key words OFDM, Adaptive modulation, Water-filling

1 引言

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^[1]。通过循环前缀和快速傅里叶变换, OFDM 将频率选择性衰落信道变为相互正交的平坦衰落子信道。当循环前缀的长度不小于信道冲击响应的长度时, OFDM 能够有效克服由频率选择性衰落引起的码间串扰, 实现数据的高速传输。OFDM 技术已经被广泛应用于非对称的数字用户环路(ADSL)、数字视频广播(DVB)和无线局域网(WLAN)等通信系统中。

传统OFDM系统的子载波采用同样的调制方式, 系统性能主要取决于信道增益最差的子载波。自适应调制技术根据各子载波的增益动态地分配功率和传输比特数并选择相应的调制方式, 能够显著提高系统的性能。按照不同的优化目标, 自适应OFDM算法主要分为3类: 功率和比特数不变时误码率最小化的MA(Margin Adaptive)算法^[2, 3]、功率和误码率上限不变时传输速率最大化的RA(Rate Adaptive)算法^[4-8]和比特数和误码率上限不变时发送功率最小化的算法^[4, 8, 9]。按照不同的分配原则(优化函数), 可以分为递增式的贪婪

(greedy)分配算法^[4]、基于信道容量公式的分配算法^[2, 5]和基于误码率公式的分配算法^[3, 6, 7, 9]。一般的通信系统都是功率受限的, 所以实际系统中MA和RA算法受到了更多的关注。MA算法适用于电话等对服务质量要求严格或者固定速率传输的系统, 而RA算法适用于视频或Email等可变速率传输的系统。

本文主要研究无编码 OFDM 系统的自适应 MA 算法。为了分析方便, 一般算法都假设发射端已知准确的信道信息。文献[2]利用无编码系统能有效传输的信息量与香农容量的信噪比差值为一个与误码率有关的常数, 提出基于容量公式的快速 MA 算法。文献[3]根据 $M \geq 2$ 时 M-QAM 调制可以用统一的误码率公式表示的特点, 提出基于误码率公式的 MA 算法。该算法在最小可传输比特数 $R_{\min} \geq 2$ 时, 复杂度低于文献[2]的算法且性能略有改善。文献[8]以图像处理中的拉格朗日内插搜索法进行 RA 或 MA 方式的自适应分配, 但由于用到查表, 算法所需存储量较大而实用性不强。以上算法都是同时对子载波发送功率和比特数进行分配的。文献[9]提出了各子载波等速率发送只分配功率的 MA 算法, 以较低的复杂度提高了系统对信道的跟踪能力, 但误码率性能不如同时分配比特和功率的算法。

从自适应OFDM系统不同优化目标的算法之间的等效性出发^[8, 10], 本文提出一种以功率注水门限^[11]为迭代参数的MA

算法。下面我们首先给出比特和功率分配公式和有记忆的步长迭代原理^[12]，然后介绍算法的详细流程，最后给出仿真结果。

2 算法分析

2.1 比特和功率分配公式

实际系统中信息比特都是离散的整数值，而功率和误码率是连续的实数，所以误码率公式比容量公式的分配函数更有效^[3]。而指数形式的近似误码率公式能进一步简化算法的复杂度。M-QAM调制的近似误码率公式如下所示^[13]：

$$P_e \leq 0.2 \exp\left(-1.6 \frac{\gamma_i}{2^{b_i-1}}\right) \quad (1)$$

在 $b_i \geq 2$ 和 $P_e \leq 10^{-3}$ 时，该近似值与实际值对应的信噪比相差在 1dB 之内。对 BPSK 调制，我们得到以下近似公式：

$$P_{\text{BPSK}} \leq 0.2 \exp(-c\gamma_i) \quad (2)$$

当 $P_e \geq 10^{-7}$ 和 $c=1.1$ 时，与实际值的误差小于 0.2dB；当 $c=1$ 时，对任意的误码率，相应的信噪比误差小于 0.5dB。

当注水门限 λ 为迭代参数时，第 i 个子载波的比特和功率分配公式为^[7]

$$b_i = \lceil \log_2(\lambda g_i) \rceil^+ \quad (3)$$

$$\hat{b}_i = \text{round}(b_i) \quad (4)$$

$$s_i = \frac{\sigma^2 \Gamma}{g_i} (2^{\hat{b}_i} - 1) \quad (5)$$

其中 $\lceil x \rceil^+ = \max\{0, x\}$ ， \hat{b}_i 由系统调制方式决定， σ^2 为噪声功率， g_i 为第 i 个子载波的增益， $\Gamma = -\ln(5P_T)/C$ ， P_T 为系统误码率， C 值由式(1)，式(2)决定。在自适应调制算法中，比特分配比功率分配更有效^[2, 12]，所以我们以总比特数 $\sum \hat{b}_i$ 为目标参数，求解适当的 λ ，使得总比特数等于设定值时，系统误码率最小。 λ 的初值可设为^[5, 7]

$$\lambda = \frac{1}{N} \left(\frac{S}{\sigma^2 \Gamma} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i} \right) \quad (6)$$

与过去的算法相比，本文算法的特点主要有：(1)分配方式基于注水原理，迭代参数为注水门限；(2)以指数形式的近似误码率公式进行比特和功率分配；(3)引入了有记忆步长迭代方法。而文献[2]以系统容量和香农容量的信噪比差值 $\gamma_{\text{margin(dB)}}$ 为迭代参数，比特分配公式如下式所示

$$b_i = \log_2 \left(1 + g_i / (\gamma_0 + \gamma_{\text{margin(dB)}}) \right) \quad (7)$$

其中 γ_0 是与误码率有关的常数。

2.2 有记忆步长迭代原理

自适应 OFDM 算法的本质是一个单峰函数的最优化问题，当传输比特数为目标参数时，由于比特数是离散的整数，

它和迭代参数(λ)虽然是单调不减关系，但并不是一一对应的，在比特量化函数的临界点附近，迭代参数微小的扰动可能会造成目标函数较大的变化，从而出现当前结果比以前的结果还差的情形(例如图 1 中， E 点的结果差于 B 点)。下面，我们提出有记忆的可变步长迭代方法来避免这种现象。

如图 1 所示，假设算法从 A 点开始，每一个 λ_k 值对应一组自适应分配结果 (S_k, R_k) ， k 为迭代次数，最佳的 λ 值对应系统设定总比特数 R 。每次迭代时，系统都记忆并更新与 R 距离最小的 R_k 对应的 λ_k 作为迭代参数调节的上(下)限(例如，图 1 的上限依次是 $\lambda_M = \lambda_A \rightarrow \lambda_B \rightarrow \lambda_F \rightarrow \dots$ ，下限为 $\lambda_m = \lambda_C \rightarrow \lambda_D \rightarrow \dots$)。在后续的迭代中，将 λ 限制在记忆上下限之间，使迭代参数向最佳值夹趋逼近。例如在 E 点， $\lambda_E > \lambda_M = \lambda_B$ 时，给当前步长乘一个压缩系数 $\mu \in (0, 1)$ ，直到 $\lambda \leq \lambda_M$ (即 F 点)。由于比特和功率分配占算法运算量的绝大部分，此方法先对 λ 进行调节，以较小的复杂度保证了算法的稳定性和收敛速度。在 RA 方式的自适应算法中^[12]，这种方法获得了接近于最佳算法的结果。

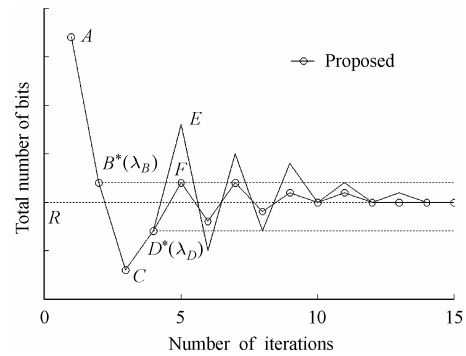


图 1 有记忆步长迭代法示意

Fig.1 Illustration of the proposed iterative method

2.3 新的功率和比特分配算法

下面我们给出以注水门限 λ 为迭代参数的 MA 算法流程。设 OFDM 子载波数为 N ，总发射功率为 S ，总比特数为 R ，算法描述如下：

(1)初始化：迭代次数 $k=0$ ，并设定其上限为 k_{max} ；按照式(6)初始化 λ_1 ，记其上限 $\lambda_M = \lambda_1$ ，下限 $\lambda_m = 0$ 。

(2) $k = k + 1$ ，如果 $k > k_{\text{max}}$ ，到第(6)步；否则令可传输数据的子载波数 $N_{\text{on}} = N$ ，对每一个子载波 i ，按照 λ_k 值和式(3) - 式(5)分配比特数和功率。如果 $\hat{b}_i = 0$ ，则第 i 个子载波不分配数据， $N_{\text{on}} = N_{\text{on}} - 1$ 。

(3)统计当前比特数 $R_k = \sum_{i=1}^{N_{\text{on}}} b_i$ ，如果 $R_k = R$ ，到第(7)步。否则令 $\Delta_R = 2^{(R-R_k)/N_{\text{on}}}$ ，如果当前和前一次的 Δ_R 都小于 0(图 1 中 B 点)，记 $\lambda_M = \lambda_k$ ；如果两次 Δ_R 都大于 0(如图 1 中 D 点)，记 $\lambda_m = \lambda_k$ ，到第(5)步。

(4)如果 $\Delta_R > 0$ ，记 $\lambda_m = \max(\lambda_m, \lambda_k)$ (图 1 中 C 点)；否则记 $\lambda_M = \min(\lambda_M, \lambda_k)$ 。

(5) 取 n 为从 1 开始增加的整数直到 λ_{k+1} 满足 $\lambda_m \leq \lambda_{k+1} = \lambda_k + \mu^n \cdot \lambda_k \cdot (\Delta_B - 1) \leq \lambda_M$, 回到第(2)步。

(6) 统计比特量化差值 $\delta_i = b_i - \hat{b}_i, \forall i = 1, \dots, N$ 。如果 $R_k > R (R_k < R)$, 寻找 δ_i 最小(最大)的子载波, 减去(加上)一个比特, 然后重新统计这个子载波的 δ_i , 重复这个过程直到 $R_k = R$ 。这一步骤的处理方法与文献[2]相同。

(7) 功率调整, 使发射总功率等于设定功率:

$$s_i = s_i \cdot \left(1 + \left(S - \sum s_i\right) / \sum s_i\right)$$

算法结束时, 所有传输比特的子载波误码率基本相等, 最后的功率分布是锯齿形^[2,5,7]。

3 仿真和讨论

仿真系统采用HiperLan II-A信道模型^[14], 信道时延扩展为 390ns。我们设采样间隔为 50ns, OFDM子载波数 $N = 64$, 循环前缀长度为 800ns (16 个采样间隔)。系统可用调制方式为: BPSK, QPSK(4QAM), 16-QAM和 64-QAM。设发端总功率 $S = N$, 每个子信道平均传输的比特数为 2, 即不进行比特分配时, 所有的子载波都采用QPSK(4-QAM)调制。

图 2 是传统的OFDM系统、只分配功率的MA算法^[9]、文献[2]的迭代算法和本文算法的误码率比较, 其中本文算法的步长系数 $\mu = 0.7$ 。从图 2 可以看出, 同时进行比特和功率分配的迭代算法比只分配功率的算法更有效, 而本文算法的误码率性能优于其他算法。图 3 是后两种算法在 $k_{\max} = 20$ 的平均迭代次数比较, 在一次迭代的计算量基本相同的条件下, 本文算法的平均迭代次数小于文献[2]的算法。这是由于, 本文算法的比特和功率分配更接近最佳的注水形式, 同时有记忆步长迭代也提高了算法的稳定性和收敛速度。

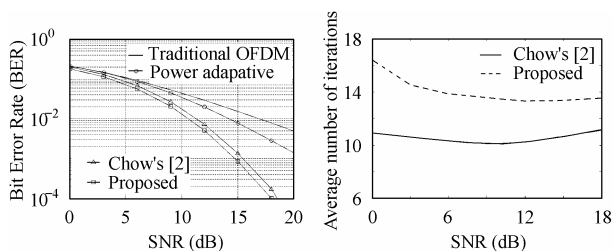


图2 MA 算法误码率比较
Fig.2 BER comparison
of different MA algorithms

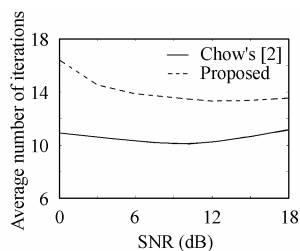


图3 本文算法和文献[2]的算法
的平均迭代次数比较
Fig.3 Average number
of iterations of MA algorithms

4 结束语

本文提出一种新的以最小误码率为目标的 OFDM 自适应调制算法。新算法基于注水原理, 并引入有记忆步长迭代方法。与过去的算法相比, 本文的算法具有较低的复杂度和更好的性能。

参考文献

- [1] Bingham J A C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come. *IEEE Commun. Mag.*, 1990, 28(5): 5 - 14.
- [2] Chow P S, Cioffi J M, Bingham J A C. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, 43(2/3/4): 773 - 775.
- [3] Fischer R F H, Huber J B. A new loading algorithm for discrete multitone transmission. *IEEE Globecom'96*, London, Nov. 18-22, 1996, 1: 724 - 728.
- [4] Hughes-Hartogs D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media. U.S. Patents Nos. 4,679,227 (July 1987), 4,731,816 (March 1988), and 4,833,706 (May 1989).
- [5] Leke A, Cioffi J M. A maximum rate loading algorithm for discrete multitone modulation systems. *IEEE Globecom'97*, Phoenix, Arizona USA, Nov. 3-8, 1997, 3: 1514 - 1518.
- [6] Wyglinski A M, Labeau F, Kabal P. An efficient bit allocation algorithm for multicarrier modulation. *IEEE WCNC*, Atlanta, GA USA, Mar. 21-25, 2004, 2: 1194 - 1199.
- [7] Jang J, Lee K B, Lee Y H. Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel. *IEEE Globecom*, San Francisco, CA USA, Dec. 1-5, 2003, 6: 858 - 862.
- [8] Krongold B S, Ramchandran K, Jones D L. Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(1): 23 - 27.
- [9] Goldfeld L, Lyandres V, Wulich D. Minimum BER power loading for OFDM in fading channel. *IEEE Trans. on Commun.*, 2002, 50(11): 1729 - 1733.
- [10] Piazza L. Optimum adaptive OFDM systems. *Euro. Trans. Telecomm.*, 2003, 14: 205 - 212.
- [11] Cover T M, Thomas J A. *Elements of Information Theory*. New York: John Wiley & Sons, 1991: 239 - 256.
- [12] 薛金银, 焦秉立. 一种改进的OFDM自适应比特及功率分配算法. *北京大学学报*, 2006, 42(1).
- [13] Chung S T, Goldsmith A J. Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(9): 1561 - 1571.
- [14] ETSI Normalization Committee. Channel models for HIPERLAN/2 in different indoor scenarios. Doc. 3ER1085B, Eur. Telecommun. Standards Inst., Sophia-Antipolis, France, 1998.

薛金银: 男, 1976年生, 博士生, 研究方向为 OFDM、MIMO 和通信中的信号处理等。

焦秉立: 男, 1951年生, 教授, 博士生导师, 从事移动通信系统 CDMA、OFDM 等方面的研究工作。