

一种基于最大容量的多载波系统 自适应调制和功率分配算法¹

赵亚红 张忠培* 吴伟陵

(北京邮电大学信息工程学院 181 信箱 北京 100876)

*(清华大学电子工程系微波与数字通信国家重点实验室 北京 100084)

摘要 该文从最大化信道容量(数据通过速率)的目标出发,基于简化的 QAM 调制统一误比特率表达式,用 Lagrange 乘数法给出了给定发送功率和 QoS 要求约束条件下最优功率和调制方式分配的闭式解,并利用 0bit 分配排除衰落大的子载波,成功地解决了实际的功率和调制方式分配的要求。最后使用连续调制离散化近似(0, QPSK, 16QAM 和 64QAM)的方法逼近基于连续调制优化的分配结果,仿真结果说明这种离散逼近的方法带来的信道容量损失可以忽略,并且能够保证给定的 QoS 要求,这种方式适合于可变速率的业务。

关键词 自适应调制, 自适应功率分配, 多载波传输, 容量优化
中图分类号 TN914

1 引言

多载波和 OFDM 技术^[1]由于其能适应未来无线移动多媒体通信系统要求的高速宽带传输而受到越来越多的关注。多载波和 OFDM 将整个宽的频带划分为多个窄的子载波,信息数据并行地在这些子载波上传输,符号时间大为扩展,从而对传统的串行宽带传输下带来的严重的符号间干扰(ISI)具有很强的抵抗力。同时,由于它们在并行的子载波上传输信息数据,整个传输带宽远大于信道的相干带宽,信道呈现频率选择性,不同的子载波上的衰落幅度大小不一。因此,在发射端已知这些子载波上的信道状态信息(CSI)的情况下,子载波间的自适应调制和功率分配可以用来提高系统的性能^[2-4],或者在保证给定的 QoS 要求下提高系统的数据通过速率^[2],从而提高系统的容量。其中前者在保证给定的数据通过速率和给定 QoS 要求下优化的目标是使系统的发送功率最小,它适用于不变速率的业务,如话音业务;而后者则保证在给定的 QoS 要求下优化给定接收 SNR(平均发送功率)下的信道容量(数据通过速率),适用于可变速率的数据业务,本文考虑的是这种容量优化问题。文献[2]中使用给定阈值的方法,即当子载波上的瞬时 SNR 超过某调制方式达到一定 BER 需要的信噪比时则在该载波上使用该调制方式,这种方式没有综合子载波上的功率分配,不是最优的分配方式。本文考虑使用 4 种 QAM 调制方式 $D = \{0, 2, 4, 6\}$,即 0, QPSK, 16QAM 和 64QAM,利用文献[5, 6]中关于 QAM 调制的误比特率简化公式,提出一种子载波组间基于 Lagrange 乘数法的最优化连续调制方式和功率分配算法,给出了最优调制方式和功率分配的闭式最优解,利用零比特分配(不传)排除衰落大的子载波组并重新分配的方法解决了正功率和正比特分配的实际约束条件,最后使用连续调制离散化近似的方法逼近基于连续调制优化的分配结果,仿真结果说明这种离散逼近的方法带来的信道容量损失可以忽略,并且能够保证给定的 QoS 要求。

2 自适应调制和功率分配的多载波系统

2.1 系统描述

考虑一个典型的具有 N 个子载波的 OFDM 系统,发端调制器产生 N 个功率归一化的数

¹ 2001-10-26 收到, 2002-01-14 改回

据符号 S_n , $0 \leq n \leq N-1$, 经 A_n 倍放大, N 个数据符号分别发送到 N 个正交的子载波上传输, 具体用基带 IFFT 变换到时域 N 个采样 s_n , $0 \leq n \leq N-1$, 为完全消除多径时延带来的符号间干扰 (ISI) 的影响, 保持子载波间的正交性, 插入长于信道时延扩展的一段循环前缀构成保护间隔, 其样点数为 G . 然后经 D/A 和低通滤波调制到载波上发送. 在接收端经滤波、载波下变频, 去掉保护间隔, 以相同的速率采样, A/D 转换后 FFT 处理得到频域符号 R_n , $0 \leq n \leq N-1$. 多径信道产生的影响可以表示为

$$R_n = A_n H_n S_n + W_n, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

其中 W_n 为频域的方差为 N_0 的复加性白高斯噪声, H_n 为第 n 个子载波上的信道乘性因子, 可以表示为

$$H_n = \sum_{l=0}^{L-1} h_l \exp \left[-j2\pi \frac{nl}{N} \right], \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (2)$$

其中 h_l , $0 \leq l \leq L-1$ 为多径信道抽头延迟线模型中的第 l 径的抽头系数, 它是一个幅度服从 Rayleigh 分布, 相位在 $(0, 2\pi)$ 之间均匀分布的随机变量, 全部抽头系数的能量归一化为 1, 即 $\sum_{l=0}^{L-1} E\{|h_l|^2\} = 1$, 进而有 $E\{|H_n|^2\} = 1$, 且 H_n 的幅度也服从 Rayleigh 分布, 则系统的信噪比定义为

$$\text{SNR} = \bar{A}_n^2 / N_0 \quad (3)$$

其中 \bar{A}_n^2 表示 A_n^2 的均值, 则子载波上的瞬时信噪比为 $\gamma_n = (A_n^2 |H_n|^2 / \bar{A}_n^2) \cdot \text{SNR}$. 当各子载波上等功率发送时, $\gamma_n = |H_n|^2 \cdot \text{SNR}$, 各载波上的瞬时信噪比由其上的瞬时乘性增益因子唯一决定.

2.2 最大信道容量的自适应调制和功率分配算法

假设 OFDM 系统的子载波上使用 M 阶调制方式, 每个调制符号发送 $c = \log_2 M$ 个比特信息, 系统在 OFDM 符号时间 T 内, N 个子载波上共发送 $N \cdot c$ 个信息比特, 而 OFDM 系统的带宽 $W = N/T$, 则系统的信道容量, 即频谱效率为 $C = (N \cdot c/T)/(N/T) = c \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$. 如果使用自适应调制, N 个载波上平均发送 P 个比特信息, 则 $C = P/N \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$.

考虑 OFDM 系统的子载波数很大, 子载波间隔小于信道的相干带宽, 而相干带宽内的子载波信道增益接近, 因此将相干带宽内的子载波归为一个载波组, 自适应调制和功率分配在载波组之间进行, 而组内各载波上使用相同的调制方式和功率. 设系统共分为 K 个载波组, 各载波组上的信道乘性因子相互独立, 则基于容量最大化的优化问题可表述为

$$\max \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_k \right], \quad \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K S_k \leq \bar{S}, \quad P_{e,k} \leq P_e, \quad 1 \leq k \leq K \quad (4)$$

其中 c_k 为第 k 个载波组上分配的调制方式每符号传送的比特数, $S_k = A_k^2$ 为载波组 k 内各载波上分配的功率, $\bar{S} = \bar{A}_k^2$ 为平均发送功率, 它决定了系统的 $\text{SNR} = \bar{S}/N_0$, $P_{e,k}$ 和 P_e 分别是第 k 个载波组上的瞬时误比特率和系统允许的误比特率. 即某时刻在载波组之间分配功率, 但总功率不超出给定的最大发送功率并保证给定的误比特率要求下最大化数据通过速率. 定义给定 SNR 条件下达到的信道容量 $C = E \left\{ \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c_k \right\}$. 根据 QAM 调制的统一误比特率公式^[5,6]

$$P_e(\gamma_k^0) = 0.2 \exp \left(\frac{-1.6\gamma_k^0}{2^{c_k} - 1} \right) \quad (5)$$

有自适应功率分配时, $\gamma_k^0 = |H_k|^2 \cdot \text{SNR} \cdot S_k / \bar{S} = \gamma_k \cdot S_k / \bar{S}$ 为载波组的瞬时接收信噪比, 由 (5)

式, $c_k = \log_2 \left[-1.6 \cdot \gamma_k \cdot \frac{S_k}{\bar{S}} / \ln(5P_e) + 1 \right]$. 则 (4) 式描述的非线性最优化问题可以用 Lagrange 乘数法求解,

$$L = \sum_{k=1}^K \log_2 \left[\frac{-1.6 \cdot \gamma_k \cdot \frac{S_k}{\bar{S}}}{\ln(5P_e)} + 1 \right] + \lambda \left[\sum_{k=1}^K \frac{S_k}{\bar{S}} - K \right] \quad (6)$$

用极值法求解最优功率分配

$$\frac{\partial L}{\partial S_k} = \frac{-1.6\gamma_k}{[-1.6\gamma_k S_k + \bar{S} \ln(5P_e)] \cdot \ln 2} + \frac{\lambda}{\bar{S}} = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K \frac{S_k}{\bar{S}} - K = 0 \quad (8)$$

联合上述两式求得给定条件下的最优功率分配

$$S_k = \bar{S} \left[1 + \frac{1}{K} \sum_{g=1}^K \frac{\ln(5P_e)}{-1.6\gamma_g} + \frac{\ln(5P_e)}{1.6\gamma_k} \right] \quad (9)$$

由此确定最优调制方式分配

$$c_k = \log_2 \left[\frac{1}{K} \sum_{g=1}^K \frac{\gamma_k}{\gamma_g} - \frac{1.6\gamma_k}{\ln(5P_e)} \right] \quad (10)$$

至此我们得到了最优连续功率和调制方式的闭式解。考虑到实际系统中功率和调制方式分配必须为非负值, 即 $S_k \geq 0, c_k \geq 0$, 则得到上述最优解存在的条件:

$$\gamma_k \geq 1 / \left[\frac{1}{K} \sum_{g=1}^K \frac{1}{\gamma_g} - \frac{1.6}{\ln(5P_e)} \right], \quad k = 1, \dots, K \quad (11)$$

可见它仅由载波组之间信道增益因子的相对大小和给定的误比特率要求决定。如果某载波组不满足上述条件, 最优分配的功率和调制方式为负值, 说明其上的信道衰落很大, 在 (4) 式的平均功率约束条件下无法满足给定的误比特率要求, 为不可用信道, 故应放弃传输, 不予分配功率和比特, 即空传送, 应该 $c_k = 0$, 不参与平均功率分配。由此, 我们给出符合实际的载波组间最优化功率和调制分配算法如下:

(1) 载波分组, 根据反馈的信道 CSI, 计算条件 (11) 式, 如果全部载波组均满足条件, 则执行 (2), 否则, 排除不满足条件的载波组, 重复此步骤, 直到全部满足条件。

(2) 根据 (9) 和 (10) 式分配给定误比特率要求和平均功率约束下的最优功率和调制方式分配。

(3) 根据实际选用的调制方式 $D = \{0, 2, 4, 6\}$, 对 (2) 中得到的连续最优调制方式进行离散化分配, $c_k < 1$ 时, 取 $c_k = 0$; $1 \leq c_k < 3$, 取 $c_k = 2$; $3 \leq c_k < 5$, 取 $c_k = 4$; $5 \leq c_k$, 取 $c_k = 6$ 。至此我们完成了符合实际条件的优化分配。

3 仿真验证和结果分析

为验证上述自适应调制和功率分配的多载波系统的性能, 检验离散化逼近的效果, 我们进行了仿真。分别仿真了具有 $K=4, 8, 16$ 个独立衰落的载波组的 3 种系统, 各仿真 10^6 次, 设定要求的误比特率 $P_e = 10^{-3}$, 不同信噪比下最优分配能够达到的信道容量和离散化逼近的结果及实际达到的误比特率分别示于图 1 和图 2。由于仿真结果发现不同独立载波组数量对相同给定

条件下的信道容量几乎没有影响，因此图 1 中只给出一组数据，说明在相同的给定的误比特率要求下，发送功率相等时达到的信道容量跟参与分配的载波组数无关，仅由误比特率和 SNR 决定，同时我们看到本文使用的离散化调制分配的方法对系统的信道容量在低于 25dB 的信噪比情况下对信道容量没有损失，但由于本文最高调制为 64QAM，限制了系统能够达到的最大信道容量不超出 6bit/(s·Hz)，当信噪比达到 30dB 以上时，实际信道容量不再增长，说明更高的信噪比不能进一步提高系统容量。图 2 中的仿真数据显示实际达到的 BER 与参与分配的独立载波组数有关，分析其原因，参与分配的独立载波组数越多，功率分配充分优化，离散调制分配的性能越接近基于连续调制优化的性能。其中 $K=4$ 个载波组在 SNR=10dB 以下的误比特率稍高于给定误比特率要求 $P_e = 10^{-3}$ 是因为基于连续调制分配的功率与离散调制逼近所要求的最优功率分配之间不匹配引起的，这种差异在一定范围内是可以忽略的。

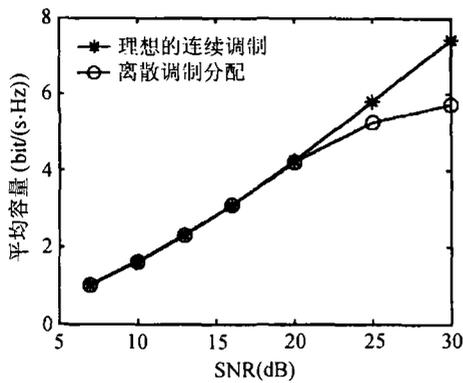


图 1 固定误比特率要求，不同信噪比达到的信道容量

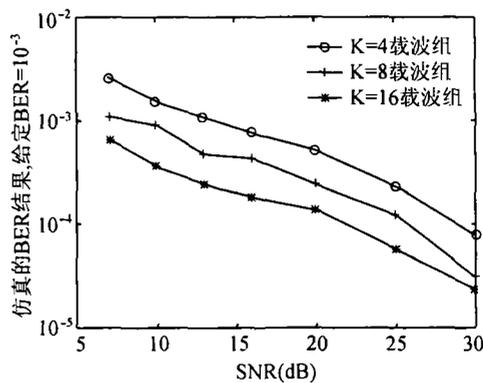


图 2 给定误比特率要求，实际达到的误比特率

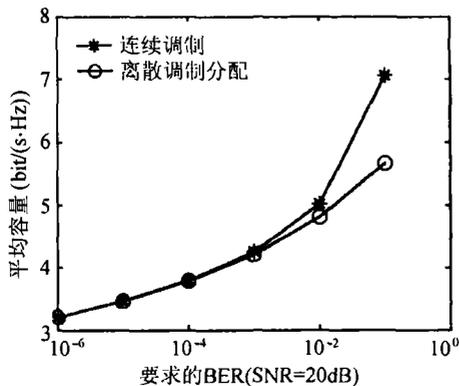


图 3 给定信噪比，不同误比特率要求下达到信道容量

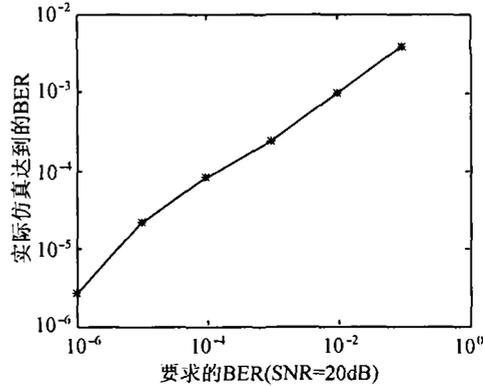


图 4 不同误比特率要求和实际达到的误比特率

我们还对固定信噪比为 20dB，独立载波组数 $K=8$ ，不同误比特率要求下的系统容量进行了仿真。实际达到的容量和误比特率性能分别示于图 3 和图 4。跟我们预期的一样，固定信噪比，要求的误比特率越小，达到的容量越小。图 4 中低误比特率要求下实际达到的误比特率跟要求的误比特率之间存在差异，是因为我们使用的 QAM 误比特率统一公式 (5) 式是实际 QAM 误比特率关系的一个近似，这种近似在低误比特率下相对突出，但也是在允许的范围之内的。

4 结 论

本文提出了多载波系统上基于最大容量的最优功率和调制方式分配问题,给出了最优解的闭式解,解决了实际正功率和调制方式的约束问题,并用离散调制逼近最优解的连续调制.仿真结果验证了这种算法的可行性,具体给出了系统可以达到的性能.当然,上述仿真都是在理想信道状态反馈并无时延的假设下完成的,实际的移动通信系统中由于多普勒频移等影响产生自适应调制发生时的信道跟反馈信息不匹配,必然带来一定的影响,这是需要进一步研究的课题.

参 考 文 献

- [1] T. Keller, L. Hanzo, Adaptive multicarrier modulation: a convenient frame work for time-frequency processing in wireless communications, Proc. IEEE, 2000, 88(5), 611-640.
- [2] T. Keller, Lajos Hanzo, Adaptive modulation techniques for duplex OFDM transmission, IEEE Trans. on Vehicular Technology, 2000, 49 (5), 1893-1906.
- [3] C. Yui Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation, IEEE J. on Selected Areas in Communications, 1999, 17 (10), 1747-1758.
- [4] S. K. Lai, R. S. Cheng, K. B. Letaief, Adaptive trellis coded MQAM and power optimization for OFDM transmission, Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th, Houston, 1999, vol.1, 290-294
- [5] Andrea J. Goldsmith, Soon-Ghee Chua, Variable-rate variable-power MQAM for fading channels, IEEE Trans. on Comm., 1997, 45(10), 1218-1229.
- [6] S. T. Chung, Andrea J. Goldsmith, Degrees of freedom in adaptive modulation: a unified view, IEEE Trans. on Comm., 2001, 49(9), 1561-1571.

A CAPACITY-MAXIMIZATION-BASED ADAPTIVE MODULATION AND POWER ALLOCATION ALGORITHM FOR MULTICARRIER SYSTEMS

Zhao Yahong Zhang Zhongpei* Wu Weiling

(School of Info. Eng., Beijing Univ. of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

*(State Key Lab on Microwave & Digital Comm., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract In this paper, the optimization of channel capacity (equivalent to data throughput) is proposed for variable-rate service, which is solved with the Lagrangian multiplier method based on a simplified BER formula for m -QAM modulation. The closed-form solution for the optimization problem is given and the practical constraint of positive power and modulation mode allocation is solved by null transmission on those deep-faded subcarriers. Finally discrete modulation mode (0, QPSK, 16QAM and 64QAM) is used to approach the optimally allocated continuous modulation mode, and simulation results demonstrate that the capacity loss from this approaching is negligible and QoS is guaranteed.

Key words Adaptive modulation, Adaptive power allocation, Multicarrier transmission, Capacity optimization

赵亚红: 女, 1974年生, 博士, 从事 OFDM 关键技术的研究, 包括同步、信道估计和自适应调制等。

张忠培: 男, 1967年生, 讲师, 博士后, 主要研究兴趣: 移动通信。

吴伟陵: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会理事、中国电子学会信息论分会主委委员, 中国通信学会会士等。主要从事信息论、信息处理、移动通信、个人通信与宽带、多媒体码分多址方面的教学与科研工作。