

# 一种低复杂度的分簇多带超宽带系统动态资源分配算法

董伟杰,俞能海,尹 勇

(中国科技大学信息处理中心,安徽合肥 230027)

**摘 要:** 提出了一种用于多用户多带超宽带系统的低复杂度动态资源分配方案,该方案在满足所有用户数据速率请求和给定的误比特率前提下,可以最小化总的系统传输功率.分析和实验表明,提出的算法与现有方法相比,性能只有很少的损失,却可以显著降低运算的复杂度.复杂度的降低主要通过把一般性的限制性优化问题转化为线性编程问题,并在求解线性编程问题的过程中寻找更好的初始解.此外,还通过对相邻的副载波进行分簇,亦降低了算法的复杂度,并为系统设计提供了更多的灵活性.最后,还通过实验研究了簇的大小和用户数目对算法和系统的影响.

**关键词:** 超宽带;多带;动态资源分配;簇

**中图分类号:** TN914, TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 10-1783-04

## A Low Complexity Dynamic Resource Allocation Scheme for Clustered Multiuser MB-OFDM Systems

DONG Wei-jie, YU Neng-hai, YIN Yong

(Information Processing Center, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract:** A low complexity dynamic resource allocation algorithm for multiuser multiband OFDM (MB-OFDM) system is proposed to minimize the total transmitting power while satisfying all users' data rate (DR) requests. The complexity is reduced by means of converting the convex optimization problem to a linear programming (LP) one, introducing the concept of cluster and other ways as finding better feasible initial solutions of the LP problem. It is shown that this algorithm only has very limited performance loss compared with current methods by numerical methods, in which the effects of cluster size and user number are also analyzed.

**Key words:** ultra wideband; multiband; dynamic resource allocation; cluster

### 1 引言

近来,超宽带 (ultra wideband, UWB) 技术由于可以用比较低的功率产生很宽频带的信号,吸引了来自商业和军事应用等多方面的注意力.多带超宽带 (multiband OFDM, MB-OFDM) 系统是一种重要的 UWB 系统,同时也是 IEEE802.15.3a 物理层标准的提案之一<sup>[1]</sup>.在文[1]中,美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 为 UWB 系统所分配的可用频带被划分为多个子带 (sub-band),每个子带有一个 OFDM 符号,包括了 128 个副载波 (subcarrier),占用带宽 528MHz. MB-OFDM 系统必须要支持最高为 200Mb/s 的传输速率.

由于 UWB 系统的传输功率谱密度 (power spectral density, PSD) 被严格地限制<sup>[2]</sup>,因此功率控制对 MB-OFDM 系统来讲是非常必要的,并且与传统的 OFDM 系统比较,也显得更为重要.目前,针对传统 OFDM 系统的功率、副载波 (subcarrier)、比特分配等已经开展了研究工作,其中在功率限制条件之下最大化系统容量<sup>[3]</sup>或者在用户数据速率 (data rate, DR) 限制条件

下最小化总的发射功率<sup>[4,5]</sup>是研究的重点.本文将考虑后一种情况.在文[4]中,作者给出了求解此类问题最优解的一个数学模型,并给出了其最优解和次优解的求解方法.文[5]中给出了一种改进的次优算法.但是,对于 MB-OFDM 系统来说,即使是文[4]和[5]中的次优解法,仍然十分复杂.

为了减少运算的复杂度,同时保持系统总的发射功率在一个比较低的水平,本文将在文[4]中所提出的模型基础上,提出一种低复杂度动态多用户联合功率和用户分配算法.该算法除了求解方法本身得到了简化之外,还使用了簇的概念,即把几个相邻的副载波划分为一个组,作为资源分配的单位.簇最早由文[6]提出,但在提出之后更多用于解决 OFDM 系统功率峰均比过高的问题.在资源分配方面,亦有人做了相关的工作<sup>[7]</sup>,但也限于单用户情况.此外,引入簇通常会使得问题的数学模型变得更为复杂,但在后面可以看到,对于本文所提出的算法,引入簇反而会降低运算复杂度.而且在本文算法中,簇的大小是可变的,这样可以根据系统的需求来采用不同的簇大小,为设计增加更多的灵活性.

## 2 系统模型

图 1 是包括了动态资源分配模块的多用户 MB-OFDM 系统框图. 通常 MB-OFDM 系统的信道是频率选择性衰落信道. 我们假设在一个副载波带宽范围内, 信道的频率响应是不变的. 用  $H(f_{k,il})$  来表示用户  $k$  在第  $l$  个簇中第  $i$  个副载波的频率响应, 则相应的信道状态信息 (channel state information, CSI) 就可以用一个衰减因子表示为  $D_{k,il} = |H(f_{k,il})|^2$ , 接收信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 为  $D_{k,il} p_{k,l}$ , 其中  $p_{k,l} = P_k / (N_o B_{sub})$  是用户  $k$  第  $l$  个簇的发送端 SNR,  $P_k$  是用户  $k$  第  $l$  个簇的发射功率,  $N_o B_{sub}$  是双边 PSD 为  $N_o/2$  的加性白噪声在一个副载波带宽  $B_{sub}$  内的功率. 因为  $k, i$  和  $p_{k,i}$  是一一对应的, 所以在下文中, 我们将直接对 SNR 进行处理, 而不是功率本身.

假设 CSI 对于收、发端均是已知的, 并且在同一个簇中所有的副载波分配相同的比特和功率. 对未分簇系统来讲, 如果给定了误比特率 (bit error rate, BER) 和调制方式, 就可以直接得到用户  $k$  第  $i$  个副载波所需的发送 SNR. 但对于分簇系统来说, 由于簇的引入使得 SNR 与 CSI 呈非线性关系, 从而导致很难直接从 CSI 得到某个簇所需的 SNR. 然而, 通过适当的处理, 我们会发现分簇能够简化运算复杂度.

## 3 动态资源分配

### 3.1 问题描述

对于多用户系统来说, 每个用户通常有自己的 DR 请求. 为了讨论的方便, 并且不失一般性, 我们假设系统可以满足所有用户的 DR 请求, 即  $R_k \leq R_{tot}$ , 其中  $R_k$  是用户  $k$  的 DR 请求,  $R_{tot}$  是系统最大可满足的 DR 请求. 由于一个簇同时只能被一个用户所占用, 所以我们引入一个离散变量  $r_{k,l}$ , 用于指示某个簇的占用情况. 只有当簇  $l$  被用户  $k$  所占用时,  $r_{k,l}$  才取值为 1, 在其他情况下取值均为 0. 这样, 我们要解决的问题就可以描述为最小化

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L r_{k,l} \quad \text{for } r_{k,l} \in \{0,1\} \quad (1)$$

同时满足限制条件

$$\sum_{k=1}^K r_{k,l} - 1 = 0, \quad \text{for } l = 1, \dots, L \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^L r_{k,l} c_{k,l} - R_k / M = 0, \quad \text{for } k = 1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M f(D_{k,il} r_{k,l} c_{k,l}) = P_{ek}, \quad \text{for all } k, l \quad (4)$$

$$r_{k,l} \geq 0, \quad \text{for all } k, l \quad (5)$$

其中,  $c_{k,l}$  是用户  $k$  第  $l$  个簇分配的比特数,  $f(D_{k,il} r_{k,l} c_{k,l})$  是与  $c_{k,l}$  相对应的 BER,  $P_{ek}$  是用户  $k$  要满足的 BER 请求. 例如, 当  $c_{k,l} = 2$  时, 调制方式为 QPSK,  $f(D_{k,il} r_{k,l} c_{k,l}) =$

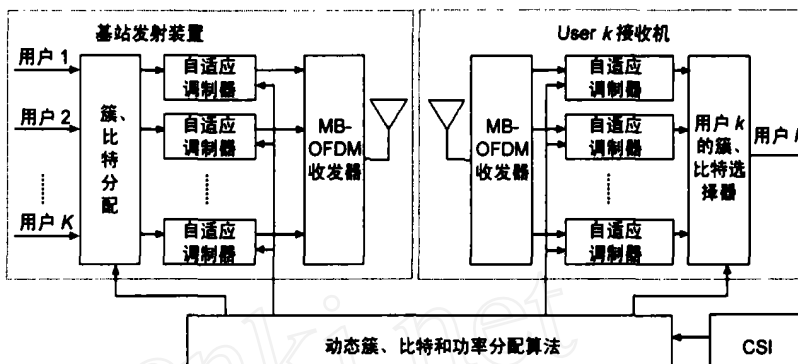


图 1 包括了动态资源分配模块的多用户 MB-OFDM 系统框图

$Q(\sqrt{2D_{k,il} r_{k,l}})$ , 其中  $Q(\cdot)$  是 Q 函数.  $M$  是簇的大小.

### 3.2 解决方案

在文[4]中, 该问题的解决方法是先把  $r_{k,l}$  视为连续变量 (在文献[4]中为  $r_{k,l}$ ), 再采用拉格朗日方法进行求解, 其求解过程相当复杂, 而且由于  $r_{k,l}$  实际上是离散变量, 得到的最优结果还进行了二次处理. 因此, 整个求解过程实际上也是一种次优解法, 而且复杂度很高.

事实上, 对于一个系统来说, 可用的调制方式通常是有限的. 而在给定了某个 BER 之后, 我们可以通过牛顿法等数值方法对所需的 SNR 值进行求解:

$$r_{k,l}^{(n+1)} = \frac{r_{k,l}^{(n)} - F(r_{k,l}^{(n)})}{F'(r_{k,l}^{(n)})} \quad (6)$$

其中  $F(x) = P_{ek} - 1/M \sum_{i=1}^M f(D_{k,il} r_{k,l} c_{k,l})$ ,  $F'(x)$  是  $F(x)$  的一阶导数. 设定了误差门限和一个小的初始值  $r_{k,l}^{(0)}$  之后, 我们就可以从式 (6) 中递归得到  $r_{k,l}$  的解. 在实际系统中, PSK 和 QAM 调制方式的 BER 都是 Q 函数, 这样为了方便数学上的处理, 通常会应用其上边界  $Q(x) \approx a \exp(-0.5x^2)$ , 其中  $a$  是一个与  $x$  的定义域有关的尺度变量. 例如, 当  $x$  定义在 0dB 至 20dB 时, 如果采用 QPSK 调制方式,  $Q(\sqrt{2}) \approx 0.214 \cdot \exp(-x)$  将是一个非常紧的上边界.

在得到了所有可能的  $r_{k,l}$  值之后, 对某个特定系统来说, 在式 (1) 中的变量  $r_{k,l}$  就可以作为变量  $r_{k,l}$  的系数进行处理, 而最初的问题也可以简化为一个线性编程 (linear programming, LP) 问题, 即

$$\min_{r_{k,l,j} \in \{0,1\}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{k,l,j} \quad (7)$$

同时满足限制条件

$$\sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J r_{k,l,j} - R_k / M = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J r_{k,l,j} - 1 = 0, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

其中  $J$  是不同方案分配的比特数.

在转化为 LP 问题后, 求解过程与文[4]中的方法相比, 将可以大为简化. 目前针对 LP 问题的求解有一些方法, 但大部分需要矩阵求逆操作. 考虑到 MB-OFDM 系统设计的需要, 以及所提出问题的特点, 可以采用 simplex 方法<sup>[8]</sup>来求解. Simplex 的优点在于仅采用矩阵的行相加或者相乘操作, 因而比

较适合硬件实现. 不过 simplex 方法的一个缺点在于进行变换之前, 必须要找到一个可行的初始解, 而该过程通常比较耗时. 但是, 对于该问题而言, 只要找到满足限制条件式 (3) 和 (8) 的解, 就可以得到可行的初始解, 而这一过程相对比较简单, 可以大大降低整个求解过程的运算复杂度.

然而, 另外一个问题是存在很多可行的初始解, 而从不同的初始解开始进行 simplex 变换, 在时间复杂度上可能会相差的比较远. 因此, 有必要找到一个合适的初始解, 从而可以进一步降低时间复杂度. 对于 simplex 变换来讲, 如果选择一个更接近最优解的初始解, 一般来说用更少的变换次数就可以得到最优解. 但是, 寻找一个好的初始解本身不能有太高的复杂度, 否则就失去了意义. 综合以上几点考虑, 我们可以先把每个簇分配给需要最小 SNR 的用户, 然后再根据用户的 DR 请求进行调整. 对于用户  $k$  来说, 如果分配到的 DR 小于请求值, 则可以增加分配已分配簇的比特数, 或者从其他分配到的 DR 大于请求的用户的簇中重新分配一部分给用户  $k$ . 在调整的过程中, 应当保证每一次调整使 SNR 增加的值最小.

详细的初始解寻找算法描述如下:

(1) 根据用户的 CSI 进行比特和簇分配, 保证每个簇的  $k, i, j$  最小. 假设用户已经分配的 DR 是  $\{R_k, k = 1, 2, \dots, K\}$ ,  $R_k$  的用户集合为  $U_1 = \{k | R_k \leq R_k\}$ , 其他用户的集合为  $U_2 = \{k | R_k > R_k\}$ .

(2) 对于用户  $k_2 \in U_2$ , 如果已经分配的比特数还没有达到最大允许的比特值, 计算增加分配一个比特引起的 SNR 差值

$$\Delta_{k_2, l, j} = k_2, l, j+1 - k_2, l, j \quad (10)$$

对于用户  $k_1 \in U_1$ , 计算把簇由用户  $k_1$  重新分配给用户  $k_2$  所引起的 SNR 差值

$$\Delta_{k_1, l, j} = k_2, l, j - k_1, l, j \quad (11)$$

对所有的  $\Delta_{k_1, l, j}$  和  $\Delta_{k_2, l, j}$  进行排序, 并选择最小的值来重新分配比特或者簇.

(3) 修改  $R_k, U_1$  和  $U_2$  的值, 重复 (2) 中的重分配过程, 直到  $U_2$  为空. 在重分配的过程中, 不允许把  $U_1$  中的用户转为  $U_2$ , 并且已经重新分配过的簇不再重新参与分配.

### 3.3 复杂度分析

由上述分析可见, 整个算法由计算  $k, i, j$  的值、寻找初始解以及 simplex 变换三部分组成. 第一部分采用的是牛顿数值递归解法, 可以高效快速地得到 SNR 解. 寻找初始解的主要过程在于计算 SNR 之间的差值和对它们进行排序, 并且计算和排序过程只需要一次, 从而计算复杂度也很低. 因此, 整个算法的复杂度主要取决于 simplex 变换.

simplex 变换的对象矩阵大小由变量的个数 (即  $r_{k, i}$ ) 和限制条件多少决定, 其复杂度主要通过变换的次数来表征. 对于所提出的问题来说, 由于  $J$  的个数可以视为常量, 变量的个数和限制条件数与簇的大小  $M$  和用户的数量  $K$  相关. 当总的副载波个数不变,  $M$  变大时, 总的簇个数减小, 从而可以减少变量的个数. 同样,  $K$  增加, 也会导致变量个数增多.

## 4 实验结果与讨论

为了更好地验证算法的性能, 我们在一个未编码的 MB-OFDM 系统中进行了测试, 这是因为给定了调制方式, 在某一特定码率和 BER 下, 可以得到系统的编码增益, 进而可以得到编码系统下需要的 SNR 值. 测试过程中, 由于 BPSK (对应于 1 比特) 和 QPSK (对应于 2 比特) 需要的 SNR 相同, 所以考虑的可分配比特方案为 2、3、4 比特, 调制方式分别采用 QPSK、8-QAM 和 16-QAM. 其他测试参数为:  $P_{ck} = 10^{-3}$ ,  $K = \{2, 3, 4, 5\}$ ,  $M = \{1, 2, 3, 5, 10, 20\}$ , 测试的信道模型是 CM2 信道<sup>[9]</sup>.

我们首先把提出的算法与文 [4] 中的最优解进行了比较. 由于文 [4] 中的系统模型是未分簇系统, 所以也用算法在  $M = 1$  情况下的结果进行比较. 从图 2 可以看出, 提出的算法与文 [4] 中的最优算法相比, 约有 0.2 dB 的性能损失, 这主要是因为求解 SNR 的时候采用了 Chernoff 上边界. 在图 2 中还给出了提出的算法与等 SNR 分配算法 (即所有的簇分配相同的 SNR) 进行比较的结果. 很明显, 无论  $M$  取何值, 提出的算法均优于后者. 这是因为等 SNR 分配算法实际上相当于把所有的副载波归到一个簇中, 而通过图 2 可以看出, 随着  $M$  的增大, 系统的性能随之下降. 主要原因在于  $M$  的增大会导致一个簇中  $D_{il, k}$  的峰均比变大, 而一个簇中每个副载波分配的传输功率是相等的, 所以为了满足给定的 BER 限制条件, 必须增加传输功率. 图 2 给出的另一个重要结论是用户数  $K$  增加会改善系统的性能, 其原因可以解释为用户越多, 多用户分集带来的增益越大.

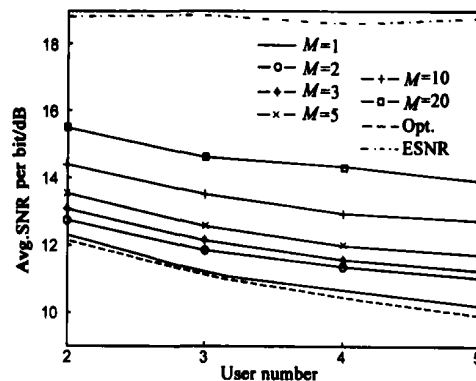


图 2  $K$  和  $M$  对平均每比特 SNR 的影响

我们还研究了  $K, M$  与时间复杂度的关系, 结果如图 3 所示. 图中的两条曲线分别对应于两个不同初始解的情况, 一条是从任意初始解开始进行 simplex 变换, 另一条是先通过提出的初始解寻找算法找到了一个初始解之后再继续进行变换. 复杂度是通过 simplex 变换的次数来表征的, 在图中已经进行了归一化, 即  $K=2$  和  $M=20$  时的变换次数归一化为 1. 由图 3 中可以看出, 运算的复杂度与  $K/M$  近似成正比, 而如果先用提出的算法找到一个初始解, 则运算复杂度平均约降低 20%, 这对于对延敏感的系统来说, 是非常有用的.

由图 2 和图 3 可以看出, 大的  $K$  和小的  $M$  可以提高系统的性能, 但从降低计算复杂度的角度来看, 却希望采用小的  $K$  和大的  $M$ . 所以, 在设计一个实际系统时, 我们必须同时考虑

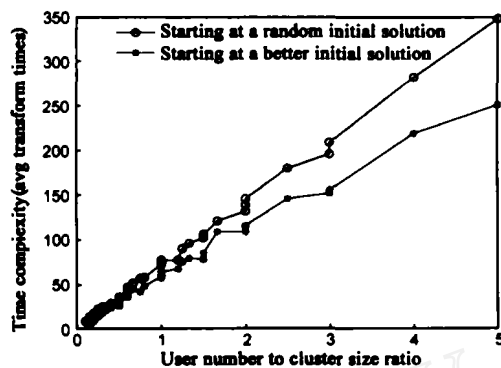


图3  $K$  和  $M$  对计算复杂度的影响

计算复杂度和传输 SNR 的影响,从而选择合适  $M$  和  $K$ ,以满足特定系统的需求。

## 5 结论

本文提出一种用于多用户 MB-OFDM 系统的低复杂度动态联合功率、簇和比特分配算法,该算法在满足所有用户 DR 请求的前提下,可以最小化总的发射功率。与文[4]中的最优解相比,提出的算法只有很小的性能损失,但是由于把一般的限制性优化问题转换为 LP 问题,可以显著降低运算复杂度。此外,通过寻找一种更好的初始解也可以进一步降低复杂度。我们还通过实验分析了簇的大小和用户数对系统性能的影响,结果表明,必须综合考虑复杂度和性能两方面的影响来选择合适的簇大小和用户数,以满足实际系统的需求。

### 参考文献:

- [1] Batra A, et al. Multi-band OFDM Physical Layer Proposal for IEEE 802.15 Task Group 3a [S]. IEEE P802.15-03/268r3, Mar. 2004.
- [2] FCC. First report and order [R]. US Washington DC: Federal Communication Commission, US Washington D. C: Federal Communications Commission, Apr. 2002.
- [3] Rhee W, Cioffi J. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation [A]. 2000-Spring Vehicular Technology Conference Proceedings [C]. IEEE, 2000. 1085 - 1089.

- [4] Wong C Y, Cheng R S, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE JSAC, 1999, 17 (10): 1747 - 1758.
- [5] Chen Y F, Chen J W, Li C P. A fast suboptimal subcarrier, bit, and power allocation algorithm for multiuser OFDM-based systems [A]. International Conference on Communications [C]. IEEE, 2004. 3212 - 3216.
- [6] Cimini J Jr, Daneshrad B, Sollenberger N R. Clustered OFDM with transmitter diversity and coding [A]. GLOBECOM'96 [C]. IEEE, 1998. 703 - 707.
- [7] Xu Z, Liu L. Power allocation for multi-band OFDM UWB communication networks [A]. 2004-Fall Vehicular Technology Conference Proceedings [C]. IEEE, 2004. 368 - 372.
- [8] Moon T C, Stirling W C. Mathematical Methods and Algorithms for Signal Processing [M]. US New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [9] J Foerster, et al. Channel modeling sub-committee report final [S]. IEEE P802.15-02/490r1-SG3a, Feb. 2003.

### 作者简介:



董伟杰 男,汉族,1977 年生于山东菏泽,现为中国科学技术大学在读博士生,主要研究方向为多媒体超宽带系统资源分配与优化。  
E-mail: dwj@mail.ustc.edu.cn



俞能海 男,汉族,1964 年生于安徽无为,教授,博士生导师,中国科学技术大学信息处理中心主任,主要研究方向为图像处理与视频通信、宽带网络、信息检索与数据挖掘以及数字媒体信息安全。

尹勇 男,汉族,1977 年生于安徽芜湖,现为中国科学技术大学在读博士生,主要研究方向为通信中的信号处理。