

## MIMO-OFDM 系统中具有 QoS 保证的动态资源分配

孙巧云 田辉 董琨 张平  
(北京邮电大学 92#信箱 北京 100876)

**摘要:** 该文在研究了多用户 MIMO-OFDM 系统中的动态资源分配问题的基础上, 提出了一种 MIMO-OFDM 系统中以获取最大系统吞吐量为目标的新的动态资源分配算法。该算法在满足用户 QoS 需求的基础上, 充分利用多用户分集特性, 使系统对空-频二维资源和发送功率进行了有效利用, 从而使系统的吞吐量得到了大幅度提高。仿真结果表明, 该算法具有良好的性能, 能够有效提高系统的吞吐量。

**关键词:** MIMO-OFDM; 动态资源分配; 特征波束成形; 服务质量

中图分类号: TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0041-04

## QoS Guaranteed Dynamic Resource Allocation for MIMO-OFDM Systems

Sun Qiao-yun Tian Hui Dong Kun Zhang Ping

(School of Telecommunications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** A QoS guaranteed dynamic resource allocation algorithm for downlink MIMO-OFDM systems is proposed based on the research on the issue of resource allocation in multiuser MIMO-OFDM systems. The proposed algorithm utilizes efficiently the spatio-frequency and power resources by taking full advantage of the multiuser diversity under the condition that the QoS requirements are guaranteed. So the system throughput is enhanced significantly. The simulation results demonstrate that the proposed scheme has good performance and can effectively enhance the system throughput.

**Key words:** MIMO-OFDM; Dynamic resource allocation; Eigen beamforming; QoS

### 1 引言

高速多媒体业务的发展要求未来无线通信能够在有限的无线资源和恶劣的信道环境下, 提供尽可能高的数据速率, 同时保证多用户不同服务质量(QoS)要求。为了实现这些目标, 多输入多输出(MIMO)技术, 正交频分复用(OFDM)技术以及动态资源分配将是不可或缺的技术。

OFDM 将频率选择性衰落信道转变为一系列平坦衰落子信道, 从而有效减少 ISI<sup>[1]</sup>。OFDM 已经成为未来无线系统中支持宽带多媒体业务的候选方案之一。MIMO 技术在发射和接收端同时采用多天线, 能够成倍提高系统容量<sup>[2,3]</sup>。在 OFDM 的基础上合理开发空间资源, 即 MIMO-OFDM, 在频域和空间域划分出并行的空间子信道, 将是满足未来无线通信系统设计需求的一个很好的解决方案<sup>[4]</sup>。在 MIMO-OFDM 系统中, 利用不同用户独立的频率和空间的选择性衰落, 进行联合的空间和频率域的多用户动态资源分配, 在最大化 MIMO 空间复用增益的同时, 获取空频联合的多用户分集增益, 在保证用户 QoS 的前提下, 尽可能提高系统的性能与资源利用率<sup>[5]</sup>。

文献[6,7]中研究了多用户 MIMO-OFDM 系统中的资源分配问题, 结果表明, 这些文献中提出的子载波和比特分配准则能够大大提高系统的性能。然而, 在这些文献中只考虑了具有最大特征值的一个或两个空间子信道。实际上, 我们可以利用更多的非零特征值空间子信道来传输信息。

本文将利用所有非零特征值空间子信道来进行数据传输, 在总发射功率受限, 满足用户 QoS(比如 BER)要求的条件下, 提出了一种能够使信道容量最大化的动态资源分配算法。该算法利用了所有可用的子信道, 充分利用了系统内在的分集, 有效地提高了系统吞吐量, 提高了资源利用效率, 同时又保证了多个用户的 QoS 要求。

### 2 系统模型

基于 SVD(Singular Value Decomposition)的多用户 MIMO-OFDM 下行链路系统模型如图 1 所示。基站端有  $M_t$  根天线, 用户端有  $M_r$  根天线。OFDM 子载波数为  $N$ , 每个子载波只分配给一个用户。假设系统中有  $K$  个用户, 且用户是均匀分布在小区中的, 这样各个用户所经历的信道可以看作是相互独立的。

定义  $M_r \times M_t$  矩阵  $\mathbf{H}_{k,n}$  为用户  $k$  在子载波  $n$  上的信道增益矩阵, 矩阵元素  $[\mathbf{H}_{k,n}]_{p,q}$  表示第  $q$  个发射天线到第  $p$  个接收天线之间的复增益。rank( $g$ ) 表示矩阵的求秩操作, ( $g$ )<sup>H</sup>

2007-07-02 收到, 2008-04-25 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z283, 2006AA01Z260)和国家自然科学基金(60496312)资助课题

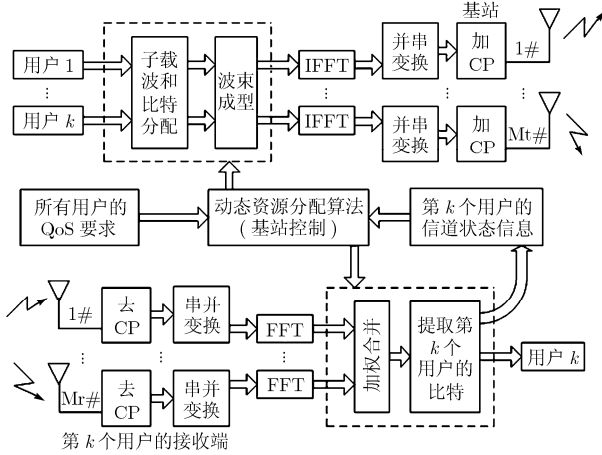


图1 多用户MIMO-OFDM系统模型

表示Hermitian转置, 通过配置合适的天线加权系数, 可由信道矩阵来构建一组平行的空间子信道<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{H}_{k,n} = \mathbf{U}_{k,n} \mathbf{S}_{k,n} \mathbf{V}_{k,n}^H = \sum_{i=1}^{\text{rank}(\mathbf{H}_{k,n})} \mathbf{u}_{k,n}^i s_{k,n}^i (\mathbf{v}_{k,n}^i)^H \quad (1)$$

其中  $s_{k,n}^i$  表示按降序排列的奇异值,  $\mathbf{u}_{k,n}^i$  为属于  $s_{k,n}^i$  的单位左奇异向量,  $\mathbf{v}_{k,n}^i$  为属于  $s_{k,n}^i$  的单位右奇异向量。令  $\mathbf{v}_{k,n}^i$ ,  $\mathbf{u}_{k,n}^i$  分别为子载波  $n$  上第  $i$  个空间子信道上的发射天线加权矢量和接收天线加权矢量, 这样每个子载波上的MIMO信道就可以划分为多个独立的并行的SISO空间子信道。

在发射端, 用户的数据送到子载波和比特分配模块中, 根据用户的信道状态信息, 采用文中介绍的子载波和比特分配算法, 将子载波分给用户, 并将用户的数据比特分配到子载波上。然后将信息比特映射到由特征波束成型得到的所有的空间特征子信道上, 所得的符号送入 IFFT 模块中做 OFDM 调制, 并将 OFDM 符号加上循环前缀, 最后从发射天线发送出去。在接收端, 对信号作相反处理, 解调并分离出每个用户的数据信息。

### 3 多用户 MIMO-OFDM 系统的自适应资源分配

在保证用户的 QoS 要求和总发射功率恒定的条件下, 以获取最大的系统吞吐量为目标, 给出了一种 MIMO-OFDM 系统中的动态资源分配算法。该算法主要包括 3 个步骤: (1) 子载波分配; (2) 功率分配; (3) 比特整数化调整。标志符  $\text{round}(x)$  表示对  $x$  做四舍五入得到的整数。

#### 3.1 多用户 MIMO-OFDM 系统中的子载波分配

本节讨论在多用户的条件下, 单个子载波的分配准则。为了防止共信道干扰, 假设一个子载波只分给一个用户。设第  $n$  个子载波分给第  $k$  个用户,  $M$  为可获得的空间特征子信道的数目,  $b_{k,n}^i$  为第  $i$  个空间子信道上携带的比特数,  $P_{k,n}^i$  为第  $i$  个空间子信道上的发送功率,  $\text{BER}_{\text{target}}$  为目标误比特率。

单载波上空间子信道的最优化问题表述如下:

$$\max \sum_{i=1}^M b_{k,n}^i \quad (2)$$

约束为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^M P_{k,n}^i &= P_{k,n} \\ \text{BER}_{k,n}^i &\leq \text{BER}_{\text{target}} \\ M &= \min \{M_r, M_t\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里采用 MQAM 调制, 在衰落信道条件下, 误比特率的近似表达式为<sup>[8]</sup>

$$\text{BER}_{k,n}^i = 0.2 \exp \left[ -\frac{3P_{k,n}^i (s_{k,n}^i)^2}{2\sigma^2 (2^{b_{k,n}^i} - 1)} \right] \quad (4)$$

设空间子信道  $i$  上分配的功率为  $p$ , 则可以得到:

$$b_{k,n}^i = g(p) = \log \left[ 1 - \frac{3p (s_{k,n}^i)^2}{2\sigma^2 \ln(5\text{BER}_{\text{target}})} \right] \quad (5)$$

$g(p)$  表示当空间子信道上的功率为  $p$  时, 其相应加载的比特数。在给子载波  $n$  上的空间子信道分配功率时, 可将功率  $P_{k,n}$  等额度划分为  $Np1$  份, 即  $\Delta p = P_{k,n}/Np1$ , 暂时不考虑比特的整数性要求, 采用贪婪算法在子载波  $n$  的所有空间子信道上分配功率  $P_{k,n}$ , 即比较各个空间子信道上每增加一个等量的发送功率  $\Delta p$  时, 可以额外获得的发送比特, 即

$$\Delta \text{bit} = g(p + \Delta p) - g(p) \quad (6)$$

选择  $\Delta \text{bit}$  最大的那个空间子信道, 在该子信道上增加  $\Delta p$  功率, 重复这个过程直到  $Np1$  份  $\Delta p$  分完。最后, 子载波  $n$  的第  $i$  个空间子信道上得到的功率为  $P_{k,n}^i$ 。根据式(5), 可得到相应的比特分配为  $b_{k,n}^i = g(P_{k,n}^i)$ 。

$$\text{令 } \xi_{k,n}^i = -\frac{3P_{k,n}^i}{2\sigma^2 \ln(5\text{BER}_{\text{target}})}, \text{ 式(5)可以重写为}$$

$$b_{k,n}^i = \log \left( 1 + \xi_{k,n}^i (s_{k,n}^i)^2 \right) \quad (7)$$

用户  $k$  在子载波  $n$  上能够传输的比特数量:

$$b_{k,n} = \sum_{i=1}^M b_{k,n}^i = \log \left( \prod_{i=1}^M \left( 1 + \xi_{k,n}^i (s_{k,n}^i)^2 \right) \right)$$

给定一个固定功率  $P$ , 根据上述方法可以计算出所有用户在子载波  $n$  上传输的比特数量。子载波  $n$  分配给在其上传输比特数量最大的用户, 即

$$\hat{k} = \arg \max_{k,k \in \{1, \dots, K\}} \left\{ \log \left( \prod_{i=1}^M \left( 1 + \xi_{k,n}^i (s_{k,n}^i)^2 \right) \right) \right\} \quad (8)$$

#### 3.2 多用户 MIMO-OFDM 系统动态资源分配

引入  $\rho_{k,n}$  来表示是否将子载波  $n$  分配给用户  $k$ 。若  $\rho_{k,n} = 1$ , 表示子载波  $n$  分配给了用户  $k$ ; 若  $\rho_{k,n} = 0$ , 表示子载波  $n$  不分配给用户  $k$ 。多用户自适应资源分配的最优化目标是实现最大系统吞吐量, 相应的最优化问题描述如下:

$$\max \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} b_{k,n} \quad (9)$$

约束为

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} P_{k,n} &\leq P_{\text{total}} \\ \text{BER}_{k,n} &\leq \text{BER}_{\text{target}} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

上述的最优化问题可以分解为 3 个步骤来实现。(1)将子载波逐一分配给在其上传输速率最高的用户;(2)对所有的空间子信道利用贪婪算法进行功率分配,并且得到相应的比特分配;(3)对加载的比特进行整数化调整。

具体的算法过程如下:

**第 1 步 初始化** 对所有的信道矩阵  $\mathbf{H}_{k,n}$  做 SVD, 得到  $M$  个特征值  $s_{k,n}^1 \geq \dots \geq s_{k,n}^M > 0$ , 矩阵  $\mathbf{H}_{k,n}$  的维数为  $\text{Mr} \times \text{Mt}$ ,  $M = \min\{\text{Mr}, \text{Mt}\}$ ,  $k \in \{1, \dots, K\}$ ,  $n \in \{1, \dots, N\}$ , 所有空间子信道上的功率值都为零, 即  $P_{k,n}^i = 0$ ,  $\Delta p = P_{\text{total}}/Np$ 。

**第 2 步 分配子载波** 根据上述的子载波分配准则, 逐一将子载波分给用户:

$$\rho_{k,n} = \begin{cases} 1, & \hat{k} = \arg \max_{k, k \in \{1, \dots, K\}} \left\{ \ln \left( \prod_{i=1}^M \left( 1 + \xi_{k,n}^i (s_{k,n}^i)^2 \right) \right) \right\} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

**第 3 步 分配功率** 由于每个子载波只分配给一个用户, 每个空间子信道也只对应着某一个用户, 在完成子载波的分配之后, 可以不再考虑用户  $k$  的影响, 对所有的空间子信道  $j, j \in \{1, 2, \dots, N \times M\}$  利用贪婪算法来分配总的发送功率。假设空间子信道  $j$  对应的特征值为  $s_j$ , 则对应  $P_j = 0$ ,  $b_j = 0$ ,  $\Delta \text{bit}_j = g(\Delta p) - g(0)$ ;

重复下列步骤  $Np$  次:

$$j^* = \arg \max_{j, j \in \{1, 2, \dots, N \times M\}} (g(P_j + \Delta p) - g(P_j)) = \arg \max_{j, j \in \{1, 2, \dots, N \times M\}} (\Delta \text{bit}_j)$$

$$P_{j^*} = P_{j^*} + \Delta p, \quad \Delta \text{bit}_{j^*} = g(P_{j^*} + \Delta p) - g(P_{j^*})$$

结束;

根据最后分配到的功率计算所有空间子信道得到的比特:  $b_j = g(P_j)$ ;

**第 4 步 比特整数化调整** 由式(5)可得:  $P_j = g^{-1}(b_j)$

$$= \frac{2\sigma^2(1-2^{b_j})\ln(5\text{BER}_{\text{target}})}{3(s_{k,n}^i)^2}.$$

计算  $\hat{b}_j = \text{round}[b_j]$ ,  $\text{diff}_j = b_j - \hat{b}_j$  以及  $\hat{P}_j = g^{-1}(\hat{b}_j)$ ;

若  $\sum_{i=1}^{N \times M} \hat{P}_j > P_{\text{total}}$ , 则选择  $\text{diff}_j$  最小的那个空间子信道, 并从上面减去一个比特;

若  $\sum_{i=1}^{N \times M} \hat{P}_j < P_{\text{total}}$ , 则选择  $\text{diff}_j$  最大的那个空间子信道, 并在上面增加一个比特;

重复直到  $\sum_{i=1}^{N \times M} \hat{P}_j$  从左侧逼近  $P_{\text{total}}$ , 剩余的功率舍弃不用。

## 4 仿真结果与分析

系统的仿真参数如表 1 所示。

表 1 MIMO-OFDM 系统信道容量最大化的分配算法仿真参数

仿真参数	数值
发送天线数 $\text{Mt}$	4
接收天线数 $\text{Mr}$	2, 4
OFDM 子载波数 $N$	128
用户数 $K$	4-16
每个用户要求的 BER	$10^{-6} - 10^{-4}$
额定总功率 $P_{\text{total}}$	20W

仿真给出了本文提出的算法的性能曲线, 并将其与另外两种动态分配算法作比较。其中一种算法与本文算法的不同之处在于, 它在子载波的空间子信道上平均分配功率, 即  $P_{k,n}^i = P_{k,n}/M$ , 则有

$$b_{k,n}^i = \ln \left[ 1 - \frac{3P_{k,n} (s_{k,n}^i)^2}{2\sigma^2 M \ln(5\text{BER}_{\text{target}})} \right]$$

下面称之为空间子信道平均算法<sup>[9]</sup>。另一算法与本文算法的不同之处在于, 它只利用了单个子载波的  $M$  个空间子信道中特征值最大的那一个, 而其余的空间子信道放弃不用, 下面称之为最大特征值算法<sup>[6]</sup>。同时定义, 子载波平均发射信噪比为  $P/(N\sigma^2)$ 。

图 2 给出了发送和接收天线分别为 4 时的最大特征值算法和本文算法的性能比较。从仿真结果可以看到本文算法的吞吐量比只用最大特征值空间子信道算法的吞吐量大大增加, 这是由于本文算法利用所有非零特征值空间子信道传输数据, 充分利用了空间资源, 提高了系统的吞吐量。

与最大特征值算法相比, 本文算法与空间子信道平均算法利用了空间所有可用的空间子信道来传送信息, 图 3 给出了在子载波平均发射信噪比为 8-24dB 时, 这 3 种方案的系统吞吐量的差异。从图中可以看出, 在低信噪比时, 本文算法和最大特征值算法性能相近, 而空间子信道平均算法性能和前两种的差距大约 50bit/OFDM 符号。这是由于在子载波平均发送信噪比低的时候, 信道的状况整体都不是很好, 这样本文算法和最大特征值算法能够充分利用增益较大空间子信道, 避免了使用增益很小的空间子信道。而空间子信道平均算法在所有的空间子信道上都分相同的功率, 吞吐量就会受到影响。当信噪比较高时, 空间子信道平均算法的性能超越了最大特征值算法, 并接近于本文算法。这是因为高信噪比的情况下, 信道状况很好, 子载波的并行空间子信道的信道增益相差不大, 本文算法和平均算法能够利用所有的空间子信道进行信息的传输, 而最大特征值算法只利用一个空间子信道, 存在着资源的浪费, 没有充分利用空间资源, 因而前两种算法能达到更大的吞吐量。

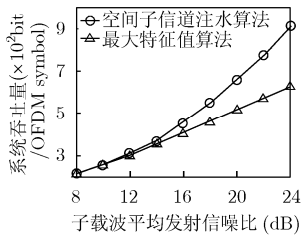


图 2 吞吐量性能比较

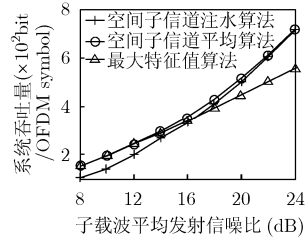


图 3 几种算法性能比较

图 4 给出了不同用户数情况下, 本文算法的系统吞吐量的差异。其中, 比特误码率为  $10^{-6}$ , 用户数分别为 1, 4, 8, 16。从图中可以看出, 随着小区用户数的增加, 整个系统的吞吐量也在增加。这种增加是由于多用户分集产生的。由于各个用户经历独立的衰落过程, 通过对所有用户按照准则式 (8) 进行选择, 能最大程度地利用多用户信道状态的随机性, 用户数越多, 信道变化越随机, 每个时刻就越有可能选择一个接近其信道峰值状况的用户进行传输, 所以, 随着用户数增加, 系统吞吐量也在增加。

图 5 比较了子载波平均发射信噪比为 8-24dB 时, 本文算法在不同误比特率约束条件下的系统吞吐量。小区内有 4 个用户, 误比特率约束分别为  $BER = 10^{-6}, 10^{-5}$  和  $10^{-4}$ 。从图中可以看出, 随着约束误比特率的增大, 系统吞吐量的增加量逐渐变大, 例如在 16dB 处,  $BER = 10^{-6}$  和  $10^{-5}$  的系统吞吐量相差约为 20bit/OFDM 符号, 而  $BER = 10^{-5}$  相对  $10^{-4}$  约为 50bit/OFDM 符号。

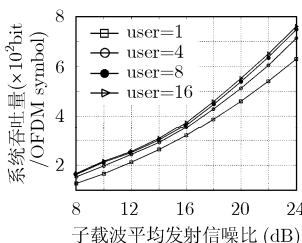


图 4 不同用户数下的系统吞吐量

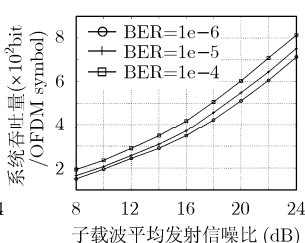


图 5 不同误比特率约束下的系统吞吐量

## 5 结束语

本文提出的算法是一种基于多用户 MIMO-OFDM 系统的动态资源分配算法。该算法在总发射功率一定, 保证用户的 QoS 要求(例如 BER 要求)的条件下, 使信道容量达到最大。该算法利用了所有可用的子信道, 并且充分利用了系统内在的分集, 有效地提高了系统吞吐量, 提高了资源利用效

率。随着用户数和业务需求进一步增加, 动态资源分配算法的优势将会得到进一步体现。由于该算法在子载波分配和功率分配中都用了贪婪算法, 计算复杂度有一定的提高。

## 参考文献

- [1] John A C. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come [J]. *IEEE Comm Mag*, 1990, 37(5): 5-14.
- [2] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [3] Raleigh G G and Cioffi J M. Spatio-temporal coding for wireless communication [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1998, 46(3): 357-366.
- [4] Zhang Y J and Letaief K B. An efficient resource allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 2005, 53(1): 107-116.
- [5] Zhang Y J and Letaief K B. Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems [J]. *IEEE Wireless Commun. Mag.*, 2006, 13(4): 38-47.
- [6] Hu Z P, Zhu G X, Xia Y, and Liu G. Multiuser subcarrier and bit allocation for MIMO-OFDM systems with perfect and partial channel information [C]. *IEEE WCNC*, Atlanta, Georgia, USA, Mar. 21-25, 2004: 1188-1193.
- [7] Pan Y H, Letaief K B, and Cao Z G. Dynamic spatial subchannel allocation with adaptive beamforming for MIMO/OFDM systems [J]. *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 2004, 3(6): 2097-2107.
- [8] Goldsmith A J and Chua S G. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1997, 45(10): 1218-1230.
- [9] Lu X F and Zhu G X, et al. Spatial subchannel allocation algorithm based on mutiuser MIMO/OFDM systems[J]. *Journal on Commun.*, 2006, 27(9): 34-39.

孙巧云: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO-OFDM 系统中的调度、动态资源分配等。

田 辉: 女, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代无线通信网、无线传输技术等。

张 平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为下一代无线通信新理论与新技术。