

多用户 MIMO-OFDM 的资源分配和性能分析

黄艺毅, 李昊

HUANG Yi-yi, LI Hao

上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240

School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

E-mail: satanjessie@sjtu.edu.cn

HUANG Yi-yi, LI Hao. Resource allocation and performance analysis in multi-user MIMO-OFDM. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(1): 142-144.

Abstract: In this paper, we mainly discussed multi-user MIMO-OFDM in order to provide a fair network resource allocation for each user. Firstly we provided a brief introduction of MIMO-OFDM model, then we introduced the utility function. Secondly we discussed how to allocate resources, and here we focused on how to allocate sub carries to each user and how to allocate entire power to each subcarry. Finally, we gived our simulation results and analyzed the performance.

Key words: MIMO; OFDM; sub carries allocation; power allocation

摘要: 论文主要考虑多用户的 MIMO-OFDM 问题, 以使得各个用户更公平有效地分配网络资源。文章首先给出 MIMO-OFDM 模型, 然后引入反映用户满意程度的效益函数, 并给出在 MIMO-OFDM 模型下的效益函数具体形式。其次, 进行资源分配, 重点考虑 OFDM 的各个子载波该分配给哪个用户, 以及总功率该如何分配给各个子载波, 从而实现系统的最优化。最后, 文章给出了仿真结果, 并着重对仿真结果进行了详细的性能分析。

关键词: MIMO; OFDM; 子载波分配; 功率分配

文章编号: 1002-8331(2008)01-0142-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN915

1 引言

影响信息高速传输的最主要的一类干扰是信道的多径效应, 在频域上表现为频率选择性衰落。多载波调制 OFDM 可以有效地对抗多径传输所造成的符号间干扰。另一方面, MIMO 技术利用多个天线实现多发多收, 在不增加频谱资源和天线发送功率的情况下, 可以成倍地提高信道容量。因此, MIMO-OFDM 技术既可以对抗大频率选择性衰落, 又可以提高信道容量。在文中, 我们考虑多用户 MIMO-OFDM 模型。通过对网络中的资源进行合理分配, 使得用户的平均满意程度达到最大。其中重点考虑 MIMO-OFDM 系统中的各个子载波该分配给哪个用户, 以及总功率该如何分配给各个子载波。

2 系统模型

2.1 MIMO-OFDM 模型

在 MIMO-OFDM 模型中(见图 1), 假设 M_i 个发送天线和 M_r 个接收天线。

假设无线信道共有 L 条路径, 考虑多用户的情况, 不妨假设用户 i 的信道模型的信道时域公式为:

$$h_i(t, \tau) = \sum_{l=1}^L \gamma_{i,l}(t) \delta(\tau - \tau_{i,l})$$

其中, $\gamma_{i,l}(t)$ 为用户 i 在时刻 t 在第 l 条路径上的复高斯增益, $\tau_{i,l}$ 为用户 i 在时刻 t 在第 l 条路径上的时间延迟。假设在一个 OFDM 块中, 其频域模型保持不变, 又设噪声功率密度为 $N_i(f)$,

则用户 i 在该信道上的信噪比 SNR 为:

$$\rho_i(f) = \frac{|H_i(f)|^2}{N_i(f)}$$

对于给定 BER(比特错误速率), 在频率 f 处的信道容量为:

$$c_i(f) = \text{lb}(1 + \beta p(f) \rho_i(f))$$

其中 $p(f)$ 为对频率 f 处分配的传输功率密度。其中 $\beta = \frac{1.5}{-\ln(5BER)}$ 。假设给用户 i 所分配的频率区间为 D_i , 则用户 i 的传输速率为

$$r_i = \int_{D_i} c_i(f) df$$

在这里, 假设功率的约束条件为:

$$\frac{1}{B} \int_0^B p(f) df \leq 1$$

其中 B 为整个频谱带宽。

由于实际中 OFDM 信号的频谱不可能是连续的, 因此必须把上面的连续表达式变为离散表达式。设用户 i 在子载波 k 上的频率传输相应为 $H_i[k]$, 在子载波 k 上的噪声频谱为 $N_i[k]$ 。并设共有 N_c 个子载波数, 则有 $N_c \Delta f = B$, 其中 Δf 为每个子载波的频率宽度。对于第 k 个子载波 ($k=1, 2, \dots, N_c$), 有

$$\rho_i[k] = \frac{|H_i[k]|^2}{N_i[k]}$$

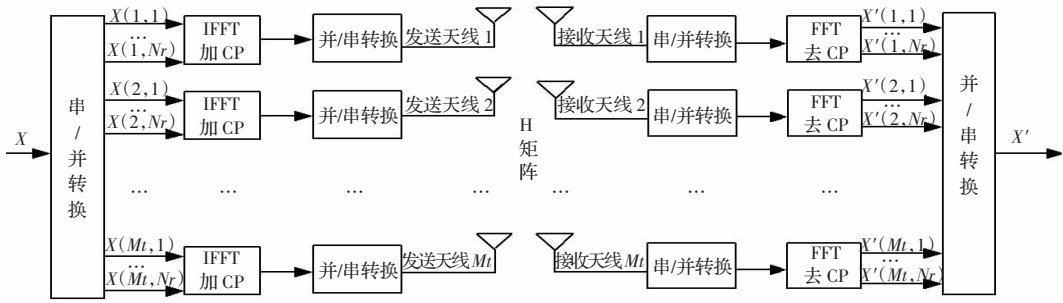


图1 MIMO-OFDM 模型

$$c_i[k] = \text{lb}(1 + \beta p[k] \rho_i[k])$$

$$r_i[k] = \sum_{k \in D_i} c_i[k] \Delta f$$

$$\sum_{k \in N_c} p[k] \leq \bar{P}$$

其中 $r_i[k]$, $c_i[k]$ 和 $\rho_i[k]$ 分别表示用户 i 在子载波 k 上的信息传输速率, 信道容量, 信道信噪比, $p[k]$ 为子载波 k 上分配的功率。

2.2 效益函数

效益函数将各个用户所用的网络资源映射为一个实数, 从而反映各个用户的满意程度。显然, 该函数应该和传输速率 r 有关:

(1) $U(r)$ 是传输速率的非减函数。

(2) $U(r)$ 的斜率应该随着传输速率 r 的增加而减小。

在文中, 使用的效益函数具体见参考文献[2], 则对于用户 i 而言, 其效益函数为:

$$U_i(r) = 0.16 + 0.8 \ln(r_i - 0.3)$$

那么系统的平均效益函数为:

$$\max \text{mize } \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(r_i)$$

subject to

$$\bigcup_{i=1}^M D_i \subseteq [0, B]$$

$$D_i \cap D_j = \Phi$$

我们的目标即使该函数最大化。

2.3 MIMO 模型

对于用户 i 而言, 其第 l 条路径上的频率响应为:

$$H_{i,l} = \begin{bmatrix} h_{i,l}^{1,1} & h_{i,l}^{2,1} & \cdots & h_{i,l}^{n_i,1} \\ h_{i,l}^{1,2} & h_{i,l}^{2,2} & \cdots & h_{i,l}^{n_i,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,l}^{1,n_i} & h_{i,l}^{2,n_i} & \cdots & h_{i,l}^{n_i,n_i} \end{bmatrix}$$

则用户 i 在第 k 子载波上的频率响应为:

$$H_i[k] = \sum_{l=0}^{L-1} H_{i,l} e^{-j2\pi \frac{kl}{N_c}}$$

对 $H_i[k]$ 进行 SVD 分解, 并用 H 代替 $H_i[k]$, 有:

$$H = U \Lambda V$$

其中 U 和 V 均为酉矩阵, V^* 为 V 的共轭矩阵。 $\Lambda = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_m}, 0, \dots, 0)$, 其中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 为 $W = H^*H$ 的正特征值, $m = \min(M_t, M_r)$ 。并规定 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m > 0$ 。令

$$x' = V^* x, y' = U^* y, n' = U^* n$$

则可以将 MIMO 模型转换为 m 个互不相关的并行子信道, 每

个子信道的增益为 $\sqrt{\lambda_i}$ 。这样等价于将 MIMO 模型转换为 m 个 SISO 模型。首先选取具有最大 λ 的信道(即增益为 $\sqrt{\lambda_1}$)的信道来代替原来的 MIMO 模型。对于用户 i 在第 k 个子载波上的信道信噪比而言, 有

$$\rho_i[k] = \frac{|H_i[k]|^2}{N_i[k]} = \frac{\lambda_{i,1}}{N_i[k]}$$

在单特征值的基础上考虑多特征值的情况。对于用户 i 在第 k 个子载波上的第 j 个特征值信道的信噪比为

$$\rho_{i,j}[k] = \frac{|H_{i,j}[k]|^2}{N_i[k]} = \frac{\lambda_{i,j}}{N_i[k]} \quad j=1, 2, \dots, m$$

则用户 i 在第 k 个子载波上的信道容量为

$$C_i[k] = \sum_{j=1}^m \text{lb}(1 + \beta D_{ij}[k] \rho_{i,j}[k])$$

其中 $D_{ij}[k]$ 为用户 i 在第 k 个子载波上第 j 个特征值信道上分配的功率。

3 算法描述

主要引用文献[2]提出的几种算法。这些算法讨论 OFDM 的各个子载波该分配给哪个用户, 以及总功率该如何分配给各个子载波从而实现效益函数的最优化。现介绍如下:

3.1 DSA 算法

假设功率平均分配在整个频率带宽, 即 $p(f) = 1$ 。则目标函数化简为:

$$\max \text{mize } \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(r_i)$$

subject to

$$\bigcup_{i=1}^M D_i \subseteq [0, B]$$

$$D_i \cap D_j = \Phi$$

3.2 APA 算法

假设子载波分配是固定的。则目标函数化简为:

$$\max \text{mize } \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(r_i)$$

subject to

$$\sum_{k \in N_c} p[k] \leq \bar{P}$$

$$p[k] \geq 0$$

3.3 joint-DSA-APA

假设子载波和功率的分配都是不固定的, 则目标函数化简为:

$$\begin{aligned} & \max \text{ mize } \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M U_i(r_i) \\ & \text{subject to} \\ & \bigcup_{i=1}^M D_i \subseteq [0, B] \\ & D_i \cap D_j = \Phi \\ & \sum_{k \in N_c} p[k] \leq \bar{P} \\ & p[k] \geq 0 \end{aligned}$$

4 仿真结果与性能分析

4.1 参数说明

在本文仿真中,假设无线信道有三条路径(即 $L=3$),设可以接受的最大 BER 为 10^{-6} 。设 $\Delta f=10 \times 10^3$,从而保证总频宽和用户数成线性增加关系。因此,假设一个 OFDM 符号中包含的载波数目为 $N_c=8 \times$ 用户数,保护间隔为 $2 \times$ 用户数。

4.2 性能分析

当信道平均信噪比从 0 dB-30 dB 变化,用户数为 2 和 4 时,分别比较了不同天线数目时的各个改进算法和单输入单输出时的各个算法的效益函数值(见图 2 和图 3)。从这些仿真图,可以得到以下性能分析:

- (1)当算法、用户数和天线数目固定时,无论是 MIMO 还是 SISO 的情况,随着 SNR 的增加,效益函数值也增加,但其增加幅度(即效益函数的导数)随之减小,其值都趋向于平缓。
- (2)当 SNR 和用户数一定时,MIMO 和 SISO 的比较:使用

MIMO 都显然优于 SISO,并且随着天线数的增加,效益函数值也随之增加。当 SNR 趋向于 ∞ 时,MIMO 和 SISO 的差值也经历了一个从大逐渐减小并且最后趋于平缓。

(3)考虑 DSA 算法和 APA 算法对 joint-DSA-APA 算法的影响程度:

假设当信道的 SNR 趋于很大(即发射功率趋于无穷),考虑 joint-DSA-APA 算法的各个子载波上的功率分配情况,如表 1。

表 1 SNR=50 dB 和 100 dB 时,joint-DSA-APA 算法各子载波功率分配(用户数目为 2,发射、接受天线为 2)

子载波	1	2	3	4	5	6	7	8
功率(50 dB)	0.059 7	0.059 1	0.060 5	0.060 0	0.060 9	0.060 6	0.059 4	0.059 1
功率(100 dB)	0.059 5	0.060 7	0.061 2	0.061 6	0.060 3	0.059 5	0.060 2	0.058 7

子载波	9	10	11	12	13	14	15	16
功率(50 dB)	0.060 3	0.060 1	0.060 9	0.058 4	0.060 2	0.059 5	0.058 9	0.060 3
功率(100 dB)	0.058 9	0.060 1	0.059 8	0.060 9	0.060 8	0.060 0	0.060 3	0.060 0

当 SNR=50 dB 时,计算各个子载波上的总功率为 0.952 0(当用 DSA 算法时,平均每个子载波上的功率为 0.059 5),则方差 σ^2 为 1.66×10^{-5} 。当 SNR=100 dB 时,计算各个子载波上的总功率为 0.962 3(当用 DSA 算法时,平均每个子载波上的功率为 0.060 1),则计算方差 σ^2 为 9.23×10^{-6} 。

由此可见,当发射功率趋于无穷的时候,joint-DSA-APA 算法的各个子载波上的功率分配接近于平均分配,即与 DSA 算法很类似。因此,DSA 算法对整体优化起主要作用。

(4)考虑多特征值的情况

当发射天线和接受天线为 2,用户数为 2,以 DSA 算法为例,当信噪比 SNR 从 0 dB-200 dB 变化时,单特征值算法和多

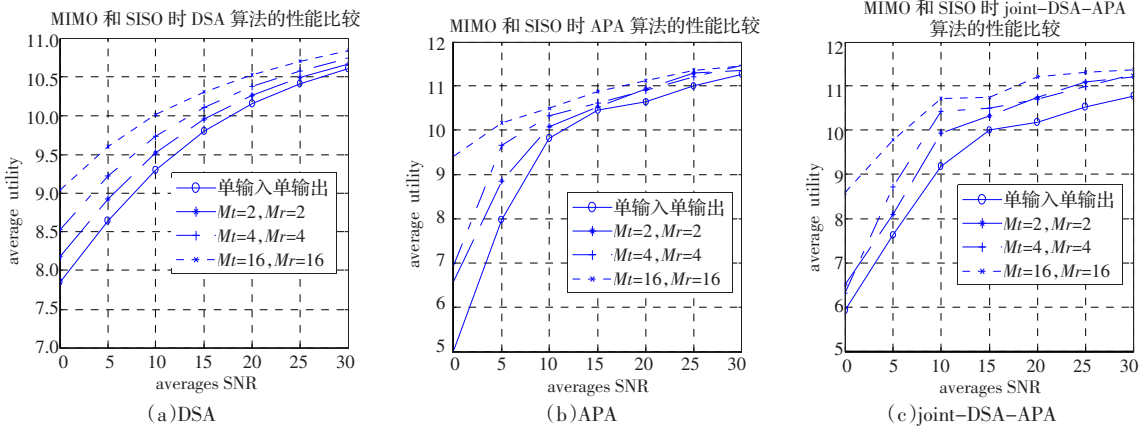


图 2 MIMO 和 SISO 三种算法的比较(2 个用户)

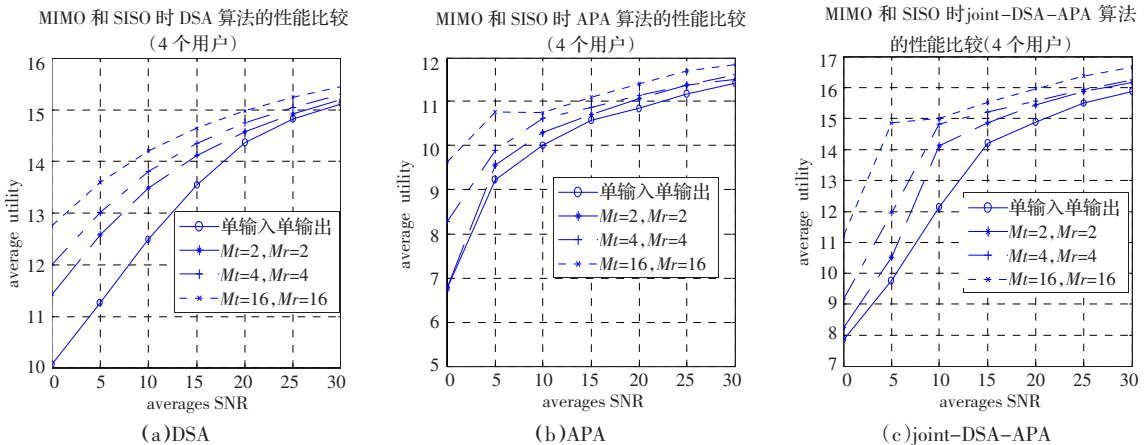


图 3 MIMO 和 SISO 三种算法的比较(4 个用户)

(下转 161 页)