

# 基于多用户空间相关性的 MIMO-OFDM 下行链路资源分配

张成文, 张中兆, 马永奎

(哈尔滨工业大学 通信技术研究所, 哈尔滨 150080)

**摘要:**针对多用户 MIMO-OFDM 下行链路, 满足各用户速率及误比特率需求的最小化系统功率问题, 提出按用户空间相关性分组的子载波独占方式与共享方式相结合的资源分配算法。空间高度相关的用户分在一组, 组内按比例公平原则以独占方式分配子载波; 组间以收发结合的基于零空间交集的分组迫零算法实现子载波共享; 用户以贪婪算法独立分配比特功率。仿真结果验证所提算法不仅系统总功率小于独占方式及基本迫零共享方式, 而且频谱利用率高于独占方式、所需天线数小于基本迫零共享方式。

**关键词:**通信技术; 多天线正交频分复用; 多用户; 自适应资源分配; 迫零算法

**中图分类号:** TN911.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5497(2008)03-0719-07

## Resource allocation scheme based on multiuser spatial correlation for MIMO-OFDM downlink

Zhang Cheng-wen, Zhang Zhong-zhao, Ma Yong-kui

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** With the goal of minimizing the overall transmit power while satisfying the required data rate, an adaptive algorithm combined exclusive manner with shared manner was proposed for multiuser MIMO-OFDM systems in downlink scenario. Subcarriers allocation to users was conducted according to user spatial correlations in this algorithm. The users with high spatial correlations were placed in same group, and on the basis of rule of proportion fairness, subcarriers were allocated in an exclusive manner in the same group. While in different groups, subcarriers were allocated in the shared manner using grouping zero forcing method. Then greedy method was used to allocate bits and power to different users. Simulation results show that the overall power of the proposed algorithm is less than both the exclusive manner and the shared manner, the spectrum efficiency is improved compared to the exclusive manner, and the number of antennas is less than that of the shared manner as well.

**Key words:** communication; MIMO-OFDM; multiuser; adaptive resource allocation; zero forcing

多用户 MIMO-OFDM 系统, 由于不同用户空间位置的随机性及无线信道的频率选择性和时变性, 使不同用户在不同子载波、不同空间具有不同的传输能力, 结合自适应资源分配可以在频率

收稿日期: 2007-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60432040).

作者简介: 张成文(1973-), 男, 讲师, 博士研究生. 研究方向: 移动通信. E-mail: zcw@hit.edu.cn

通讯联系人: 张中兆(1951-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 信号与信息处理. E-mail: zzzhang@hit.edu.cn

维、空间维同时获取多用户分集,提高系统频谱利用率及功率效率<sup>[1]</sup>。目前,多用户 MIMO-OFDM 系统自适应资源分配方法分为两类:子载波独占方式及共享方式。文献[2]利用独占方式通过将子载波分配给其上信噪比最优的用户,实现系统比特、功率的最优分配。共享方式多数文献基于 MIMO 系统研究<sup>[3,4]</sup>,文献[4]针对 MIMO 系统,指出存在空间高度相关用户时共享方式系统性能恶化,提出 TDMA 与 SDMA 结合的算法改进了系统性能。文献[5]提出将空间相关性大的用户分在一组,组内用户以独占方式分配子载波,组间用户利用基站端多用户检测共享子载波,但因终端计算复杂度受限不能应用于下行链路。针对下行链路,文献[6]提出的用户接收端采用多用户检测及迫零算法的共享方式,也没考虑终端的复杂性;文献[7]提出的基站端利用迫零算法进行 CCI 抑制的共享方式,没有考虑用户相关性的影响,且没有结合自适应比特分配。

独占方式仅在频率维利用多用户分集,没有充分利用系统的空间资源,系统性能不是最优且频谱利用率低;共享方式系统性能受用户空间相关性、基站天线数及计算复杂度的限制。作者针对 MIMO-OFDM 下行链路,满足各用户速率及误比特率要求的最小化系统发射功率问题,研究了基于用户空间相关性分组的子载波独占与共享方式相结合的自适应资源分配算法。

### 1 系统模型及优化问题描述

MIMO-OFDM 系统室外环境,基站端有  $n_T$  个发射天线,共有  $K$  个用户,每个用户有  $n_R$  个接收天线,共有  $N_c$  个子载波,每个子载波可看作平坦衰落信道,并且  $GI$  个循环前缀可完全抑制 ISI。多用户 MIMO-OFDM 自适应资源分配系统如图 1。

由于室外环境基站周围散射体少,可以认为

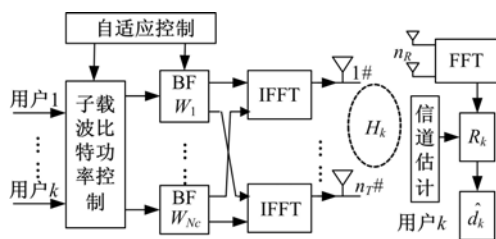


图 1 多用户 MIMO-OFDM 自适应资源分配系统  
Fig. 1 Multiuser MIMO-OFDM resource allocation systems

基站端信道相关、用户端信道不相关,信道矩阵模型可由波离角(DOD)生成。用户  $k(k=1,2,\dots,K)$  在子载波  $m(m=1,2,\dots,N_c)$  的  $n_R \times n_T$  维信道矩阵为

$$\mathbf{H}_m^k = \mathbf{G}_m^k \mathbf{A}_m^k = \begin{bmatrix} h_{1,1}^{k,m} & h_{1,2}^{k,m} & \cdots & h_{1,n_T}^{k,m} \\ h_{2,1}^{k,m} & h_{2,2}^{k,m} & \cdots & h_{2,n_T}^{k,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R,1}^{k,m} & h_{n_R,2}^{k,m} & \cdots & h_{n_R,n_T}^{k,m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{G}_m^k$  是  $n_R \times D_k$  维零均值、单位方差的独立同分布复高斯矩阵; $\mathbf{A}_m^k$  是  $D_k \times n_T$  维导引矩阵, $D_k$  是发射阵列相应 DOD 多径数; $h_{i,j}^{k,m}$  为第  $j$  发射天线到第  $i$  接收天线间的信道增益。这里,假设基站端和每个用户端都已知信道矩阵,而且不考虑信道估计误差的影响。对于均匀线阵, $\mathbf{A}_m^k$  可表示为

$$\mathbf{A}_m^k = \frac{1}{\sqrt{D_k}} \times [a^T(\theta_{k1}), \dots, a^T(\theta_{kD_k})]^T$$

$$a(\theta) = [1, e^{j2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}}, \dots, e^{j2\pi (n_T-1) \frac{d \sin \theta}{\lambda}}] \quad (2)$$

式中:符号 T 表示转置; $d$  为阵元间隔; $\lambda$  为载波波长; $\theta$  为 DOD。

由于室外环境信道矩阵的最大奇异值远大于其他奇异值,信道能量集中在最大奇异值信道,因此本文对每个用户的子载波均仅采用最大奇异值信道发送信息符号。令  $\mathbf{d}_m^k, \mathbf{W}_m^k, \mathbf{R}_m^k$  分别为用户  $k$  在子载波  $m$  的发送数据流、发射加权向量、接收合并向量,则用户  $k$  在子载波  $m$  的接收信号  $\mathbf{Y}_m^k$  可表示为

$$\mathbf{Y}_m^k = \mathbf{H}_m^k \mathbf{W}_m^k \mathbf{d}_m^k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{H}_m^k \mathbf{W}_m^j \mathbf{d}_m^j + \mathbf{n}_m^k \quad (3)$$

式中: $\mathbf{n}_m^k$  表示接收机噪声。

等式(3)右侧第一项为用户  $k$  在子载波  $m$  的期望信号,第二项为其他用户在子载波  $m$  的共道干扰(CCI)。

用户接收端进行信号合并处理后结果为

$$\hat{\mathbf{d}}_m^k = \mathbf{R}_m^k \mathbf{Y}_m^k = \mathbf{R}_m^k \mathbf{H}_m^k \mathbf{W}_m^k \mathbf{d}_m^k + \sum_{j=1, j \neq k}^K \mathbf{R}_m^k \mathbf{H}_m^k \mathbf{W}_m^j \mathbf{d}_m^j + \mathbf{R}_m^k \mathbf{n}_m^k \quad (4)$$

通过合理选择  $\mathbf{R}_m^k, \mathbf{W}_m^k$ ,可抑制多用户间的共道干扰,实现等效信道的线性收发关系。

多用户 MIMO-OFDM 系统下行链路,满足各用户速率及误比特率要求时,最小化系统发射功率的自适应资源分配问题的数学模型为

$$\begin{aligned} & \arg \min_{b_m^k, b_m^k} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{N_c} P_m^k \\ & \text{subject to: } \sum_{m=1}^{N_c} b_m^k = R_k \quad \forall k \\ & \text{BER}_m^k < \text{BER}_{\text{target}} \end{aligned} \quad (5)$$

共享同一子载波的各用户发射功率满足

$$P_m^k = g(\text{BER}_{\text{target}}, b_m^k, \{\mathbf{H}'_m^{k'}\}_{k'=1, \dots, K}, \{P_m^{k'}\}_{k'=1, \dots, k-1, k+1, \dots, K}) \quad (6)$$

可见,不同用户的  $P_m^k$  是相关的,但是由于  $g(\cdot)$  的闭式表达式很难求得,最优问题变得相当复杂。

降低复杂度的次优算法可通过子载波独占或迫零算法,使用户接收的干扰信号为零,从而

$$P_m^k = g(\text{BER}_{\text{target}}, b_m^k, \{\mathbf{H}'_m^{k'}\}_{k'=1, \dots, K}) \quad (7)$$

即某用户的比特功率分配与其他用户的比特功率分配无关,使复杂的多用户资源分配问题转化为简单的多个并行独立单用户的资源分配问题。但两种方法的系统性能与用户空间相关性的关系不同。

## 2 用户空间相关性与系统性能

### 2.1 用户空间相关性

信道矩阵通过奇异值分解(SVD),可表示为

$$\mathbf{H}_m^k = \mathbf{U}_{k,m} \mathbf{\Lambda}_{k,m} \mathbf{V}_{k,m}^H \quad (8)$$

将最大奇异值向量  $\{\mathbf{v}_{k,m}\}_1$  作为用户  $k$  在子载波  $m$  的空间签名,则两用户空间相关系数为

$$\rho_{k_1, k_2}^m = \{\mathbf{v}_{k_1, m}^H\}_1 \{\mathbf{v}_{k_2, m}\}_1 \quad (9)$$

对于基站端均匀线阵,因 DOD 角度扩展很小可认为单径,并且不同子载波的 DOD 相同,则用户空间签名为

$$\{\mathbf{v}_{k,m}\}_1 = \frac{1}{\sqrt{n_T}} [1, e^{j2\pi \frac{d \sin \theta_k}{\lambda}}, \dots, e^{j2\pi (n_T-1) \frac{d \sin \theta_k}{\lambda}}]^H \quad (10)$$

带入式(9)两用户空间相关系数可表示为

$$\rho_{k_1, k_2}^m = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{n_T}} \left| \frac{1 - \exp(j2\pi \frac{d}{\lambda} n_T (\sin(\theta_{k_1}) - \sin(\theta_{k_2})))}{1 - \exp(j2\pi \frac{d}{\lambda} (\sin(\theta_{k_1}) - \sin(\theta_{k_2})))} \right|, & \theta_{k_1} \neq \theta_{k_2} \\ 1, & \theta_{k_1} = \theta_{k_2} \end{cases} \quad (11)$$

因此,通过调整用户的 DOD 可改变用户的空间相关性。当  $d = \lambda/2, n_T = 4, \theta_{k_1} = 0^\circ, \theta_{k_2}$  取不同值时,两用户的空间相关性如图 2 所示。由图可见,当用户

的 DOD 夹角小于  $10^\circ$  时相关系数大于 0.9。

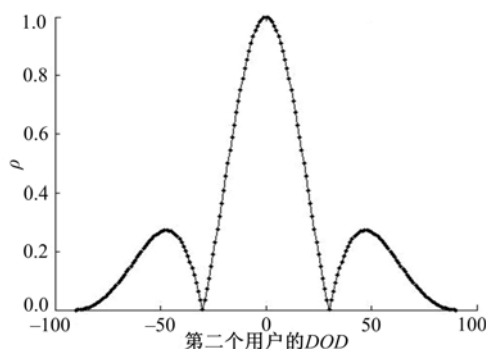


图 2 DOD 与两用户空间相关性

Fig. 2 Relation of DOD and spatial correlation for two users

### 2.2 直接共享方式

对多用户系统若直接共享所有子载波,采用单用户的资源分配方法,以前面两用户为例,每个用户速率为平均每个子载波 3 比特,子载波为 64 时,BER、 $E_b/N_0$  与用户 DOD(对应用户相关性)关系如图 3。由图可见,用户的 DOD 在 25 到 30 范围时(相关系数小于 0.1),BER 随系统功率增加而降低。然而随 DOD 的减小(相关性增加),即使增加功率也无法降低误比特率,系统无法正常工作,这正是由于用户空间相关性导致 CCI 存在的结果。

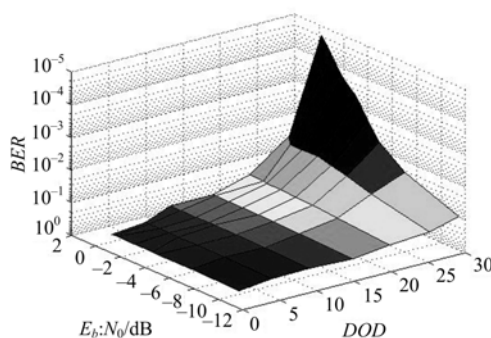


图 3 直接共享方式 BER、 $E_b/N_0$  及 DOD 的关系

Fig. 3 Relation of BER,  $E_b/N_0$  and DOD in direct share mode

### 2.3 独占方式与共享方式性能比较

独占方式每个子载波唯一分配给某个用户,任意子载波都不存在 CCI,作为资源分配重要参数的子载波信道增益(信道矩阵特征值)与用户空间相关性无关,因此用户空间相关性对系统性能没有影响。但由于没有充分利用多用户的空间分集,频谱利用率低,可以推断当用户数量增加时每个用户可分配的子载波数减少,将无法满足不同

速率要求。

共享方式不同用户利用空间特性共享同一子载波,可提高系统容量,但需对 CCI 进行处理。典型方法是基于波束形成(BF)的迫零算法<sup>[8]</sup>,迫零算法描述为

$$\mathbf{W}_{k,opt} = \arg \min_{\mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{n_T \times 1}} (\|\mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|_F^2) \quad (12)$$

约束条件:  $\mathbf{H}_i \mathbf{W}_k = 0 (i, k = 1, 2, \dots, K, i \neq k)$

$\mathbf{W}_k$  为波束加权向量,既要满足对干扰用户的 CCI 为零,又要使期望用户的等效信道增益最大。 $\mathbf{W}_k$  与用户空间相关性有关,使等效信道增益随用户空间相关性的增加而减小,导致系统性能降低。

以 2.2 节中的两用户为例,  $BER = 10^{-3}$  时,系统  $E_b/N_0$  随用户相关性变化的性能比较如图 4 所示。

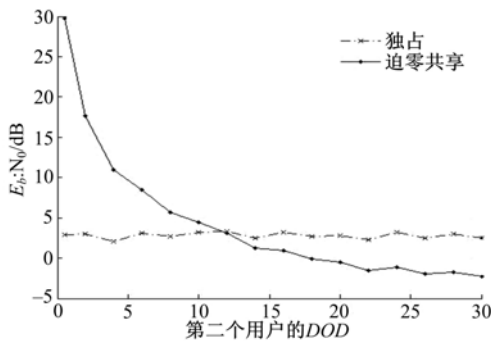


图 4 不同 DOD 时独占与迫零共享的性能  
Fig. 4 Performance of exclusive and zero force in different DOD

由图可见,独占方式所需功率不受用户相关性的影响,但当用户高度不相关时其性能不是最优;迫零共享方式当用户高度相关时,因等效信道增益小,为达到 BER 要求所需功率非常大,将导致系统崩溃。因此提出基于用户空间相关性分组的子载波独占与分组迫零共享相结合的资源分配算法,改进多用户系统性能。

### 3 本文多用户分组资源分配算法

#### 3.1 基于用户空间相关性的子载波分配

按用户空间相关性将高度相关的用户(DOD 夹角小于  $10^\circ$ )分在一组,组内用户以独占方式分配全部子载波。由于各组内的用户具有高度空间相关性,干扰用户组的哪个用户分配某一子载波,对期望用户组在该子载波的迫零矩阵影响不大,并且该迫零矩阵对期望组各用户的影响相同。因此,每组内用户的子载波分配可依据组内各用户

信道矩阵的等效信道增益,而不需要依据经组间迫零算法后的等效信道增益。

假定各用户信道为平坦衰落,从统计学角度各用户信道条件相同。为保证组内各用户的 QoS,以比例公平原则分配子载波,按各用户速率需求的比例交替对用户分配子载波,各用户优先占用相对利用率大的未分配的子载波。用户  $k$  对子载波  $m$  的相对利用率定义为

$$\rho_m^k = \frac{\omega_m^k \lambda_m^k}{\sum_j \lambda_m^j}; \omega_m^k = \begin{cases} 1, & \text{占用} \\ 0, & \text{不占用} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\lambda_m^k$  为用户  $k$  在子载波  $m$  的等效信道增益;  $j$  为组内用户。

假定共有  $M$  个分组,因每组仅有一个用户占用同一子载波,则对每个子载波有  $M$  个共享用户,并且任意子载波都不存在高度相关的用户,保证了迫零算法的性能。

#### 3.2 收发结合的分组迫零算法

为减少迫零算法基站端所需天线数量,针对公式(4)仅对经过接收合并处理后的等效信道迫零。当仅在最大等效信道发送信息时,基站端所需最小天线数等于子载波的共享用户数。对任意子载波,收发结合的迫零算法描述为

$$\mathbf{W}_{k,opt} = \arg \min_{\mathbf{R}_k \in \mathbb{C}^{1 \times n_R}, \mathbf{W}_k \in \mathbb{C}^{n_T \times 1}} (\|\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{W}_k\|_F^2) \quad (14)$$

约束条件:  $\mathbf{R}_i \mathbf{H}_i \mathbf{W}_k = 0, (i, k = 1, 2, \dots, M, i \neq k)$

当共享子载波的用户数较多时,迫零算法高阶矩阵  $\overline{\mathbf{H}}_k$  奇异值分解的计算复杂度很高。由于一个高阶矩阵奇异值分解转化为多个低阶矩阵奇异值分解,可降低奇异值分解的计算复杂度<sup>[9]</sup>。依据下面的定理 1,一个高阶矩阵的零空间可通过将该矩阵按行分成多个列数相同的低阶矩阵,求多个低阶矩阵零空间交集的方法得到。因此,提出将共享用户分成若干组,通过求各组干扰用户信道矩阵零空间交集的方法,计算期望用户的迫零矩阵  $\mathbf{W}_k^1$ 。由于各组用户组成的信道矩阵维数降低,使计算复杂度降低。

**定理 1:** 令  $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{m \times n}, \mathbf{B} \in \mathbb{C}^{p \times n}, \mathbf{Z}$  是  $\mathbf{A}$  的零空间,  $\mathbf{W}$  是  $\mathbf{BZ}$  的零空间; 则  $\mathbf{ZW}$  是  $[\mathbf{A}^H \mathbf{B}^H]^H$  的零空间。推广应用可求解多个矩阵零空间的交集。

经过以上分析可知,利用收发结合与用户分组迫零相结合的方法实现多用户的 CCI 抑制,既可以减少迫零算法基站所需天线数又可以降低计算复杂度。假定某一子载波的  $M$  个共享用户分

成  $G$  组,每组  $K_g$  个用户,满足:  $\mathbf{K}_1 + \mathbf{K}_2 + \dots + \mathbf{K}_G = \mathbf{M}$ 。令  $X_{g,k}$  表示第  $g$  组第  $k$  用户,不失一般性,以第 1 组用户为例,收发结合的分组迫零算法步骤如下:

(1) 由各用户的信道矩阵计算最大等效信道的接收合并向量  $\mathbf{R}_{g,k}$ :

$$\mathbf{H}_{g,k} = \hat{\mathbf{U}}_{g,k} \hat{\mathbf{A}}_{g,k} \hat{\mathbf{V}}_{g,k}^H (g:1, \dots, G; k:1, \dots, K_g)$$

$$\text{令 } \mathbf{R}_{g,k} = \{\hat{\mathbf{U}}_{g,k}^H\}_1$$

(2) 计算各干扰用户组最大等效信道矩阵零空间的交集  $\bar{\mathbf{S}}$ :

$$[(\mathbf{R}_{2,1} \mathbf{H}_{2,1})^H \dots (\mathbf{R}_{2,K_2} \mathbf{H}_{2,K_2})^H]^H =$$

$$\bar{\mathbf{U}}_2 \bar{\mathbf{A}}_2 [\bar{\mathbf{V}}_2^{(1)}, \bar{\mathbf{V}}_2^{(0)}]^H$$

$$\text{令 } \bar{\mathbf{S}}_2 = \bar{\mathbf{V}}_2^{(0)}$$

$$[(\mathbf{R}_{3,1} \mathbf{H}_{3,1})^H \dots (\mathbf{R}_{3,K_3} \mathbf{H}_{3,K_3})^H]^H \bar{\mathbf{S}}_2 =$$

$$\bar{\mathbf{U}}_3 \bar{\mathbf{A}}_3 [\bar{\mathbf{V}}_3^{(1)}, \bar{\mathbf{V}}_3^{(0)}]^H$$

$$\text{令 } \bar{\mathbf{S}}_3 = \bar{\mathbf{V}}_3^{(0)}$$

.....

$$[(\mathbf{R}_{G,1} \mathbf{H}_{G,1})^H \dots (\mathbf{R}_{G,K_G} \mathbf{H}_{G,K_G})^H]^H \bar{\mathbf{S}}_2 \dots \bar{\mathbf{S}}_{G-1} =$$

$$\bar{\mathbf{U}}_G \bar{\mathbf{A}}_G [\bar{\mathbf{V}}_G^{(1)}, \bar{\mathbf{V}}_G^{(0)}]^H$$

$$\text{令 } \bar{\mathbf{S}}_G = \bar{\mathbf{V}}_G^{(0)}$$

$$\text{则 } \bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{S}}_2 \dots \bar{\mathbf{S}}_G$$

(3) 计算第 1 组用户  $k$  的迫零矩阵  $\mathbf{W}_{1,k}^1$ :

$$[(\mathbf{R}_{1,1} \mathbf{H}_{1,1})^H \dots (\mathbf{R}_{1,k-1} \mathbf{H}_{1,k-1})^H (\mathbf{R}_{1,k+1} \mathbf{H}_{1,k+1})^H \dots$$

$$(\mathbf{R}_{1,K_1} \mathbf{H}_{1,K_1})^H]^H \bar{\mathbf{S}} =$$

$$\bar{\mathbf{U}}_1 \bar{\mathbf{A}}_1 [\bar{\mathbf{V}}_1^{(1)}, \bar{\mathbf{V}}_1^{(0)}]^H$$

$$\text{令 } \bar{\mathbf{S}}_1 = \bar{\mathbf{V}}_1^{(0)};$$

$$\text{则 } \mathbf{W}_{1,k}^1 = \bar{\mathbf{S}}_2 \dots \bar{\mathbf{S}}_G \bar{\mathbf{S}}_1$$

(4) 计算第 1 组用户  $k$  的收发加权向量及最大等效信道增益

$$\mathbf{H}_{1,k} \mathbf{W}_{1,k}^1 = \mathbf{U}_{1,k} \mathbf{A}_{1,k} \mathbf{V}_{1,k}^H \quad (15)$$

$$\text{令 } \mathbf{W}_{1,k}^2 = \{\mathbf{V}_{1,k}\}_1;$$

则  $\mathbf{R}_{1,k} = \{\mathbf{U}_{1,k}^H\}_1$ ;  $\mathbf{W}_{1,k} = \mathbf{W}_{1,k}^1 \mathbf{W}_{1,k}^2$ ; 信道增益为  $\{\lambda_{1,k}\}_1$ 。

### 3.3 用户比特功率分配

经过多用户分组子载波分配及组间迫零 CCI 抑制后,多用户资源分配问题转化为各用户独立的单用户比特、功率分配问题。单用户问题数学模型为

$$\begin{cases} P_m^k = \omega_m^k (T\sigma^2 / \lambda_m^k) (2^{b_m^k} - 1) \\ \text{subject to: } BER_m^k \leq BER_{\text{target}} \\ \sum_{m=1}^{N_c} \omega_m^k b_m^k = R_k \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\lambda_m^k$  为最大等效信道增益,由式(15)求得;  $\sigma^2$

是噪声功率;  $T$  为一定 BER 下的信噪比差 (SNR gap), 调整  $T$  可改变  $P_m^k$ , 从而满足不同 BER 的要求。

单用户的比特、功率分配问题可由经典的贪婪算法<sup>[10]</sup>求解。所有  $K$  个用户的功率和即为所求多用户问题的次优解。

## 4 性能仿真

本节对所提的资源分配算法的性能进行了 100 次 Monte Carlo 仿真验证, 仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters	
项 目	参数
仿真信道	瑞利衰落信道
多径数	4
功率延迟分布	1, e(-1), e(-2), e(-3)
时域噪声功率	10 <sup>-3</sup>
接收天线数 $n_R$	2
子载波数 $N_c$	64
保护间隔 $GI$	16
MQAM 调制比特数	0, 1, 2, 4, 6, 8

图 5、图 6 分别给出了 8 用户无高度相关 (DOD 分别为 5°、-5°、20°、-20°、35°、-35°、50°、-50°)、有高度相关 (DOD 分别为 5°、7°、20°、22°、35°、37°、50°、52°), 子载波独占方式 ( $n_T=2$ )、基本迫零共享 ( $n_T=16$ )、本文算法 ( $n_T=9$ ), 在各用户 BER=10<sup>-3</sup> 时, 所有用户平均每子载波的比特数与  $E_b/N_0$  关系图。

由图 5 可见, 独占方式频谱利用率很低; 基本迫零算法当存在高度相关用户时所需功率很高;

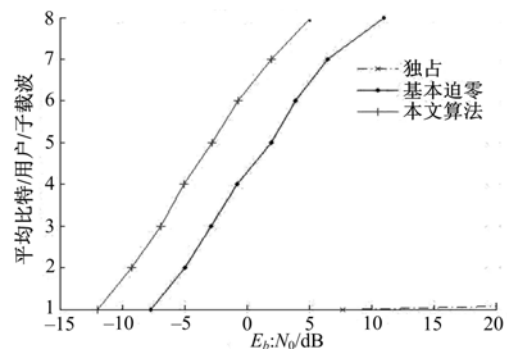


图 5 无高度相关用户时平均子载波比特数与  $E_b/N_0$

Fig. 5 Mean bits and  $E_b/N_0$  without high correlation users

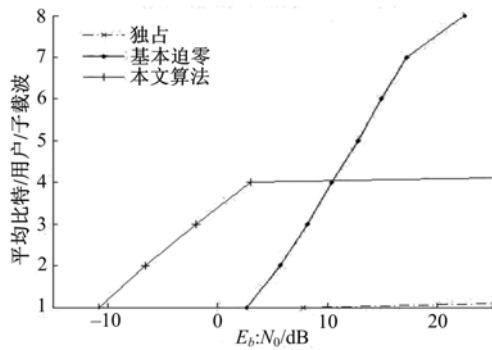


图 6 有高度相关用户时平均子载波比特数与  $E_b/N_0$

**Fig. 6 Mean bits and  $E_b/N_0$  with high correlation users**  
 本文算法在无高度相关用户时, 频谱利用率与基本迫零算法相同, 并且由于仅对最大等效信道迫零, 功率利用率比基本迫零算法提高; 而存在高度相关用户时, 由于按用户相关性将用户分成四组, 共享子载波的用户不存在高度相关性, 因此所需功率基本不受相关性影响, 但频谱利用率有所降低。同时也验证了本文算法基站端所需天线数的减少。

图 7、图 8 分别给出在 4 用户存在高度相关

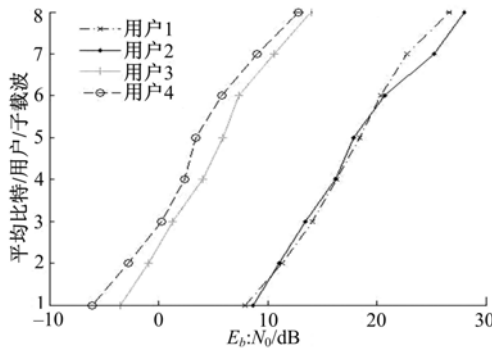


图 7 基本迫零各用户性能

**Fig. 7 Performance of each user for basic zero force**

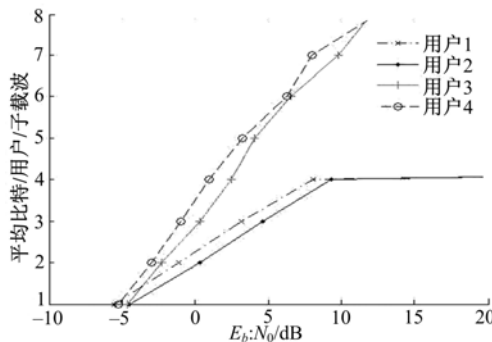


图 8 本文算法各用户性能

**Fig. 8 Performance of each user for proposed algorithm** (DOD 分别为  $5^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $35^\circ$ ), 基本迫零共享 ( $n_T=8$ )、本文算法 ( $n_T=5$ ), 各用户  $BER=10^{-3}$  时,

各用户平均每子载波的比特数与  $E_b/N_0$  关系图。可见基本迫零算法高度相关用户在任何频谱利用率时所需功率均很高, 将导致系统因功率受限而不能正常工作。但本文算法高度相关用户在低频谱利用率时所需功率仍很低, 并且相关性不高的用户的性能不受影响。

图 9 给出 8 用户高度相关 (DOD 分别为  $5^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $22^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $37^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $52^\circ$ ), 用户平均每子载波比特数为 3, 基本迫零共享 ( $n_T=16$ )、本文算法 ( $n_T=9$ ) 的 BER 与  $E_b/N_0$  关系图。由图可见, 本文算法比基本迫零方法在不同 BER 情况下, 所需功率均有 10 dB 的减少。

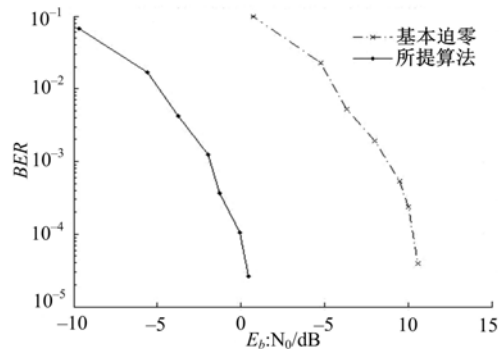


图 9 有高度相关用户时的 BER 与  $E_b/N_0$

**Fig. 9 BER and  $E_b/N_0$  with high correlation users**

以上所有仿真, 高度相关用户的 DOD 夹角均假定为  $2^\circ$ , 可以推断当用户相关性更高时基本迫零算法性能将更加下降, 而本文算法由于高度相关用户不共享子载波, 性能将不受影响。

通过前面分析及仿真, 各方法性能比较如表 2 所示。

表 2 各种方法性能比较

Table 2 Performance of different methods

比较项目	最小天线数	等效信道	频谱利用率	相关性影响	计算复杂度
独占方式	1	$n_T \times n_R$	低	无	低
基本迫零共享	$(K-1) \times n_R + 1$	$[n_T - (K-1) \times n_R] \times n_R$	高	很大	高
本文算法	K	$[n_T - (K-1)] \times n_R$	高度相关用户降低	很小	较低

## 5 结束语

针对多用户 MIMO-OFDM 系统在各用户速率及误比特率一定的条件下的最小化系统发射功率问题, 提出了一种按用户空间相关性分组的子载波独占方式与共享方式相结合的资源分配算

法。算法相对于载波独占方式在提高频谱利用率的同时降低了所需功率;相对基本迫零共享方式不仅通过用户分组解决了存在空间高度相关用户时所需功率极高的问题,而且利用收发端结合处理的方法减少了基站所需天线数,利用求解用户组零空间交集的方法降低了迫零算法的计算复杂度。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Letaief K B, Zhang Y J. Dynamic multiuser resource allocation and adaptation for wireless systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2006, 13(4): 38-47.
- [ 2 ] Hu Zhen-ping, Zhu Guang-xi, Xia Yuan, et al. Multiuser subcarrier and bit allocation for MIMO-OFDM systems with perfect and partial channel information [J]. IEEE Communications Society, WCNC 2004, 2: 1188-1193.
- [ 3 ] Spencer Q H, Swindlehurst A L, Haardt M. Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(2): 22-35.
- [ 4 ] Wang Cheng, Ross D Murch. Adaptive downlink multi-user MIMO wireless systems for correlated channels with Imperfect CSI[J]. IEEE Trans Commun, 2006, 5(9): 2435-2446.
- [ 5 ] Zhang Y J, Letaief K B. An efficient resource allocation scheme for spatial multiuser access in MIMO/OFDM systems[J]. IEEE Trans Commun, 2005, 53(1): 107-116.
- [ 6 ] Peerapong Uthansakul, Marek E Bialkowski. An efficient adaptive power and bit allocation algorithm for MIMO OFDM system operating in a multi user environment[J]. IEEE VTC, 2006, 3: 1531-1535.
- [ 7 ] Jonathan Duplcy, Louveaux. Interference-free multi-user MIMO-OFDM [J]. IEEE ICASSP, 2005, 3: 1149-1152.
- [ 8 ] Choi Lai-U, Murch R D. A transmit preprocessing technique for multiuser MIMO systems using a decomposition approach [J]. IEEE Trans Wireless Commun, 2004, 3(1): 20-24.
- [ 9 ] Golub G H, Van Loan C F. Matrix Computation (2nd ed)[M]. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1989: 583.
- [10] Hughes-Hartogs D. Ensemble modem structure for imperfect transmission media[P]. US Patents Nos. 4,679,227, July 1987; 4,731,816, Mar. 1988; and 4,833,796, May 1989.