

空间相关信道下的交替多用户调度算法

韩圣千 杨晨阳

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对多用户多输入多输出(MIMO)系统, 研究了空间相关信道下的多用户调度问题。通过推导用户信道向量夹角的统计特征, 分析了多用户调度算法对所调度用户间正交性的影响。分析结果表明在空间相关信道下现有基于串行搜索的调度方法在统计意义上降低了被调度用户之间的正交性, 从而导致基于串行搜索的调度算法与最优的穷举搜索之间存在较大的性能差距。为了提高相关信道下多用户 MIMO 系统的性能, 提出了一种基于交替搜索的多用户调度算法及其低复杂度实现方法。仿真结果表明, 所提出的用户调度算法能够有效地弥补基于串行搜索的调度方法的性能损失, 在空间独立信道和空间相关信道下以较低的计算复杂度获得接近穷举搜索的最优性能。

关键词: 多用户 MIMO 系统; 用户调度; 空间相关信道; 交替搜索

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)10-1464-08

Alternating Multiuser Scheduling in Spatially Correlated Channels

HAN Sheng-qian YANG Chen-yang

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, P. R. China)

Abstract: Multiuser scheduling for spatially correlated channels is investigated in multiuser multiple-input multiple-output (MIMO) systems. The impact of user scheduling algorithms on the orthogonality between the scheduled users is analyzed by characterizing the statistics of the angle between users' channel vectors. It is shown that existing successive searching based schedulers reduce the orthogonality between scheduled users in a statistic sense in spatially correlated channels, which leads to a large performance gap between successive searching based schedulers and the optimal exhaustive searching scheduler. In order to improve the performance of multiuser MIMO systems in spatially correlated channels, an alternating searching based user scheduling method is then proposed and its low-complexity implementation is studied. Simulation results show that the proposed user scheduler effectively recovers the performance loss caused by successive searching based schedulers, which performs close to the optimal exhaustive searching but with much lower computational complexity in both spatially independent and correlated channels.

Key words: Multiuser MIMO systems; user scheduling; spatially correlated channel; alternating searching

1 引言

在多用户多输入多输出(Multiuser multiple-input multiple-output, MU-MIMO)系统中,脏纸编码(Dirty paper coding, DPC)是能够实现广播信道容量的最优预编码^[1]。但是由于DPC需要进行复杂的矢量编码,且通常要求很大的编码长度,因此具有很高的计算复杂度^[2]。与之相比,一些次优的发射策略通过分别设计多用户预编码和多用户调度,能以较低的计算复杂度渐近地达到与DPC相同的性能,因此受到学术界和工业界的广泛关注^[1, 3, 4]。

在给定预编码算法和发射功率时,多用户调度对

系统性能有很大的影响^[5]。穷举搜索通过遍历所有可能的用户组合能够获得最优的多用户调度结果。但是当系统中候选用户数较多时,穷举搜索将具有很高的计算复杂度。串行搜索是一种降低搜索空间的有效方法,它能够将一个多维搜索问题转化为多个一维搜索问题。现有很多低复杂度的多用户调度方法均采用了类似的思路,例如贪婪用户调度算法(GUS)^[2]、准正交用户调度算法(SUS)^[6]、树状排序调度算法^[7]等。它们首先选择信道能量最大的用户作为初始用户,然后基于已选用户,迭代地从候选用户中选择新用户,直至满足一定的迭代停止准则。研究表明,在统计独立同分布(i.i.d.)平坦瑞利衰落信道下,基于串行搜索的

多用户调度算法与迫零(Zero-forcing, ZF)预编码相结合可以渐近达到最优的和数据率^[6, 8, 9]。

现有文献对串行调度算法性能的研究通常针对 i.i.d. 信道,并假设系统的总用户数趋近于无穷大^[6, 8],因此可以采用极值理论^[10, 11]降低性能分析的难度。对于任意的总用户数,[12]研究了 i.i.d. 信道下 SUS 算法在只选择两个用户时的性能,分析了 SUS 算法对所选用户的信道能量与用户间正交性的影响。这两方面因素共同决定了多用户预编码的性能以及系统的和数据率。本文将研究空间相关信道下的多用户调度问题^[13, 14]。我们将通过推导两个用户信道向量之间的角度分布,分析空间相关信道和 i.i.d. 信道对串行调度算法性能的影响,并指出与 i.i.d. 信道相比,空间相关信道将增大串行调度与穷举搜索之间的性能差距。为此,我们提出一种低复杂度的交替多用户调度算法,能够有效地弥补串行调度算法的性能损失,达到接近穷举搜索的性能。

本文所采用的数学符号定义如下:黑体大写、黑体小写和正常小写字母分别表示矩阵、行向量和标量;上标 $(\cdot)^T$ 和 $(\cdot)^H$ 分别表示对矩阵或向量进行转置和共轭转置; \mathbf{I} 表示单位矩阵, $\mathbf{0}$ 表示全零矩阵或向量; $\|\cdot\|$ 表示向量的欧式范数;对于集合 S , $|S|$ 表示 S 所包含的元素的个数。

2 系统模型

考虑包含 K 个用户的多用户 MIMO 下行链路,其中基站装有 M 个天线,用户端只有1个天线。假设基站采用线性预编码算法,则系统最多能够同时服务 M 个用户。设 $\mathcal{T}=\{1, \dots, K\}$ 表示所有候选用户的序号集合, $\mathcal{S}=\{s_1, \dots, s_L\}$ 表示 L 个被调度用户的序号集合, $\mathcal{S} \subset \mathcal{T}$,则用户 s_l 的接收信号可以表示为:

$$y_{s_l} = \mathbf{h}_{s_l} \mathbf{W} \mathbf{x} + z_{s_l} \quad (1)$$

其中, \mathbf{x} 是 L 个被调度用户的原始数据, \mathbf{h}_{s_l} 是 $1 \times M$ 维信道向量,其元素服从均值为零、协方差矩阵为 \mathbf{R}_{s_l} 的复高斯分布, z_{s_l} 是均值为零方差为 σ^2 的加性白高斯噪声, $\mathbf{W}=[\mathbf{w}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{w}_{s_L}^H]$ 是 $M \times L$ 维线性预编码矩阵。由(1)式可得用户 s_l 的信噪比(SINR)为:

$$\gamma_{s_l} = \frac{|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{w}_{s_l}^H|^2}{\sum_{j \neq l} |\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{w}_{s_j}^H|^2 + \sigma^2} \quad (2)$$

其中, $\sum_{j \neq l} |\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{w}_{s_j}^H|^2$ 表示多用户之间的干扰。

基于准确的信道信息,基站可以采用 ZF 预编码完全消除多用户间的干扰。ZF 预编码可以表示为^[15]:

$$\mathbf{W} = \mathbf{G}_S \mathbf{P}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{G}_S = \mathbf{H}_S^H (\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1} = [\mathbf{g}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{g}_{s_L}^H]$ 表示 ZF 波束形成矩阵, $\mathbf{H}_S = [\mathbf{h}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_L}^H]^H$, \mathbf{P} 表示功率分配对角矩阵,其第 l 个对角元素为 p_{s_l} , $l=1, \dots, L$ 。考虑系统对多用户进行等功率分配,则用户 s_l 的预编码向量可以表示为:

$$\mathbf{w}_{s_l} = \frac{\mathbf{g}_{s_l}}{\|\mathbf{g}_{s_l}\|} \sqrt{\frac{P}{L}} \quad (4)$$

其中 P 是基站的总发射功率。

将(4)式代入(2)式,并根据香农容量公式,可以得到采用 ZF 预编码时系统的和数据率为:

$$R(\mathcal{S}) = \sum_{l \in \mathcal{S}} \log \left(1 + \frac{P}{L \sigma^2 \|\mathbf{g}_{s_l}\|^2} \right) \quad (5)$$

当系统的总用户数 K 超过 ZF 预编码的最大服务用户数 M 时,系统需要通过多用户调度来选择被服务的用户。本文考虑系统服务尽可能多的用户,即固定服务用户数为 M 。尽管这一假设通常不能使 ZF 预编码获得最高的和数据率,但是它能够使系统具有最短的调度周期,因此可以保证延迟敏感业务的服务质量^[7]。基于以上考虑,我们可以将多用户调度问题描述为:

$$\begin{aligned} \max_{\mathcal{S}} \quad & R(\mathcal{S}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathcal{S} \subset \mathcal{T}, |\mathcal{S}| = M \end{aligned} \quad (6)$$

穷举搜索是最优的多用户调度算法,但它需要遍历各种可能的用户组合,当 K 较大时这将导致很高的计算复杂度。GUS 是一种低复杂度的串行调度算法,采用迭代的方式依次从候选用户中选择 M 个用户^[2]。定义 \mathcal{S}_i 和 \mathcal{T}_i 分别表示第 i 次迭代时已选和候选用户的序号组合,则 GUS 的具体流程可以总结如下:

(1) 初始化:选择信道能量最大的用户作为初始用户:

$$s_1 = \arg \max_{k \in \mathcal{T}_0} \|\mathbf{h}_k\| \quad (7)$$

其中, $\mathcal{T}_0 = \{1, \dots, K\}$ 。定义 $\mathcal{S}_1 = \{s_1\}$, $\mathcal{T}_1 = \{k \in \mathcal{T}_0, k \notin \mathcal{S}_1\}$, $i=1$ 。

(2) 迭代选择:

a) 基于已选用户 \mathcal{S}_i ,从 \mathcal{T}_i 中选择新的用户:

$$s_{i+1} = \arg \max_{k \in \mathcal{T}_i} R(\mathcal{S}_i \cup \{k\}) \quad (8)$$

b) 更新 $\mathcal{S}_{i+1} = \mathcal{S}_i \cup \{s_{i+1}\}$, $\mathcal{T}_{i+1} = \{k \in \mathcal{T}_i, k \notin \mathcal{S}_{i+1}\}$, $i=i+1$ 。

c) 重复步骤 a 和 b,当 $i=M$ 时停止迭代。

基于串行搜索,GUS 能够有效地减小多用户调度的搜索空间,因而具有较低的复杂度。但是,在每一次搜索过程中,GUS 仍需按照(5)式计算系统和数据率,由(3)式可知这将涉及到复杂的矩阵求逆运算。SUS

也是一种常用的串行多用户调度算法^[6]。与GUS不同,SUS在每一次搜索过程中不需要计算和数据率,而是根据候选用户信道在已选用户信道向量构成的子空间上投影的大小来选择新用户,因此具有比GUS更低的计算复杂度。

3 串行调度算法性能分析

3.1 用户正交性分析

考虑到ZF波束形成矩阵 \mathbf{G}_s 满足 $\mathbf{H}_s \mathbf{G}_s = \mathbf{I}$,我们可以得到:

$$\bar{\mathbf{H}}_{s_l} \mathbf{g}_{s_l}^H = \mathbf{0} \quad (9)$$

$$\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{g}_{s_l}^H = 1 \quad (10)$$

其中, $\bar{\mathbf{H}}_{s_l} = [\mathbf{h}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_{l-1}}^H, \mathbf{h}_{s_{l+1}}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_L}^H]^H$ 。

(9)式是关于 \mathbf{g}_{s_l} 的欠定(underdetermined)方程,其通解可以表示为^[16]:

$$\mathbf{g}_{s_l} = \mathbf{u}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+ \quad (11)$$

其中, \mathbf{u}_{s_l} 是维数为 $1 \times M$ 的任意向量, $\mathbf{Q}_{s_l}^+$ 是由 $\bar{\mathbf{H}}_{s_l}$ 张成的子空间的正交投影矩阵,它可以表示为:

$$\mathbf{Q}_{s_l}^+ = \mathbf{I} - \bar{\mathbf{H}}_{s_l}^H (\bar{\mathbf{H}}_{s_l} \bar{\mathbf{H}}_{s_l}^H)^{-1} \bar{\mathbf{H}}_{s_l} \quad (12)$$

将(11)式和(12)式代入(10)式并考虑到 $\mathbf{Q}_{s_l}^+$ 是幂等矩阵,可以得到 \mathbf{g}_{s_l} 和 \mathbf{u}_{s_l} 为:

$$\mathbf{g}_{s_l} = \mathbf{u}_{s_l} = \frac{\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+}{\|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+\|^2} \quad (13)$$

将(13)式代入(4)式和(2)式,可以得到用户 s_l 的信噪比为:

$$\text{SNR}_{s_l} = \frac{P \|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+\|^2}{L\sigma^2} \quad (14)$$

其中, $\|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+\|$ 表示 \mathbf{h}_{s_l} 在 $\bar{\mathbf{H}}_{s_l}$ 张成的子空间上的正交投影模值。考虑到 $\|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{Q}_{s_l}^+\|$ 不超过 \mathbf{h}_{s_l} 到 $\bar{\mathbf{H}}_{s_l}$ 中任一向量 \mathbf{h}_{s_i} 的正交投影模值, $i \neq l$,我们可以得到用户 s_l 的SNR上限为:

$$\text{SNR}_{s_l} \leq \frac{P}{L\sigma^2} \left\| \mathbf{h}_{s_l} \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{h}_{s_i}^H \mathbf{h}_{s_i}}{\mathbf{h}_{s_i}^H \mathbf{h}_{s_i}} \right) \right\|^2 = \frac{P \|\mathbf{h}_{s_l}\|^2 \sin^2 \theta}{L\sigma^2} \quad (15)$$

其中, θ 表示 \mathbf{h}_{s_l} 和 \mathbf{h}_{s_i} 之间的角度^[12],且满足:

$$\sin^2 \theta = 1 - \frac{|\mathbf{h}_{s_l} \mathbf{h}_{s_i}^H|^2}{\|\mathbf{h}_{s_l}\|^2 \|\mathbf{h}_{s_i}\|^2} \quad (16)$$

它表征了用户 s_l 与用户 s_i 之间的正交性。可见,为了获得高接收信噪比,所调度的用户之间应具备较好的正交性。

基于穷举搜索和基于串行搜索的调度算法具有不

同的候选用户组合,这导致它们所选出的用户之间可能具有不同的正交性。下面我们将针对穷举搜索调度和串行搜索调度的任一候选用户组合,分析空间相关信道对候选组合内多用户之间的正交性的影响。由(15)式可见,用户 s_l 的信噪比受到它与任意一个用户的正交性的限制,因此在下面的分析中我们将考虑系统服务两个用户的场景,即 $M=2$ 。同时,为了便于分析,本节考虑所有用户具有相同的空间相关矩阵 \mathbf{R} ,我们将通过仿真分析用户具有不同空间相关矩阵时的系统性能。

对于基于穷举搜索的调度算法,任意两个用户都是可能的用户组合。设 \mathbf{v}_1 与 \mathbf{u} 为任意两个用户的信道向量, θ_1 表示 \mathbf{v}_1 与 \mathbf{u} 之间的角度。对于基于串行搜索的调度算法,由第2节给出的算法流程可知,每一个候选用户组合一定包括信道模值最大的用户。设 \mathbf{v}_2 为具有最大信道模值的用户的信道向量, \mathbf{u} 为任一用户的信道向量, θ_2 表示 \mathbf{v}_2 与 \mathbf{u} 之间的角度。下面我们将分析相关信道下 $\sin^2 \theta_1$ 和 $\sin^2 \theta_2$ 的概率密度函数。

定义 $\mathbf{e}_{i,1} = \mathbf{v}_i / \|\mathbf{v}_i\|$ 且 $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_{i,1}^H, \dots, \mathbf{e}_{i,M}^H]^H$ 表示由 $\mathbf{e}_{i,1}$ 生成的标准正交基,则根据(16)式可得 \mathbf{u} 和 \mathbf{v}_i 之间的角度为:

$$\sin^2 \theta_i = 1 - \frac{q_{i,1}}{\sum_{m=1}^M q_{i,m}} \quad (17)$$

其中, $q_{i,m} = |\mathbf{u} \mathbf{e}_{i,m}^H|^2$ 。因此,为了得到 θ_i 的概率密度函数,我们需要已知 $\mathbf{q}_i = [q_{i,1}, \dots, q_{i,M}]$ 的联合概率密度函数 $f_{\mathbf{q}_i}(\mathbf{x})$,进而通过换元法可以得到 $\sin^2 \theta_i$ 的概率密度函数为:

$$f_{\sin^2 \theta_i}(x) = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \frac{\sum_{m=2}^M y_m}{x^2} f_{\mathbf{q}_i} \left(\frac{(1-x) \sum_{m=2}^M y_m}{x}, y_2, \dots, y_M \right) dy_2 \dots dy_M \quad (18)$$

将 \mathbf{v}_i 表示为 $\mathbf{v}_i = [\sqrt{\zeta_{i,1}} e^{j\phi_{i,1}}, \dots, \sqrt{\zeta_{i,M}} e^{j\phi_{i,M}}]$,并定义 $\rho_i = \|\mathbf{v}_i\|^2 = \sum_{m=1}^M \zeta_{i,m}$,则 $\mathbf{e}_{i,1}$ 可以表示为 $\mathbf{e}_{i,1} = [\sqrt{\delta_{i,1}} e^{j\phi_{i,1}}, \dots, \sqrt{\delta_{i,M}} e^{j\phi_{i,M}}]$,其中 $\delta_{i,m} = \zeta_{i,m} / \rho_i$, $0 \leq \delta_{i,m} \leq 1$, $0 \leq \phi_{i,m} \leq 2\pi$, $m=1, \dots, M$, $\delta_{i,M} = 1 - \sum_{m=0}^{M-1} \delta_{i,m}$ 。可见, \mathbf{v}_i 由 ρ_i 、 $\boldsymbol{\delta}_i = [\delta_{i,1}, \dots, \delta_{i,M}]$ 和 $\boldsymbol{\phi}_i = [\phi_{i,1}, \dots, \phi_{i,M}]$ 唯一决定。

当给定 \mathbf{v}_i ,也即给定 ρ_i 、 $\boldsymbol{\delta}_i$ 和 $\boldsymbol{\phi}_i$ 时,我们在前期工作[17]中给出了 \mathbf{q}_i 的条件概率密度函数 $f_{\mathbf{q}_i | \rho_i, \boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\phi}_i}(\mathbf{x})$ 。因此,下面我们将推导 ρ_i 、 $\boldsymbol{\delta}_i$ 和 $\boldsymbol{\phi}_i$ 的联合概率密度函数 $f_{\rho_i, \boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\phi}_i}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z})$,进而由贝叶斯公式可以得到:

$$f_{\mathbf{q}_i}(\mathbf{x}) = \int_{0 \leq z_1, \dots, z_M \leq 2\pi} \int_{y_1 + \dots + y_{M-1} \leq 1} \int_0^\infty f_{\mathbf{q}_i | \rho_i, \boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\phi}_i}(\mathbf{x}) f_{\rho_i, \boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\phi}_i}$$

$$(t, \mathbf{y}, \mathbf{z}) dt dy dz \quad (19)$$

引理 1: 在基于穷举搜索的多用户调度中,与 \mathbf{v}_1 对应的 ρ_1 、 δ_1 和 ϕ_1 的联合概率密度函数 $f_{\rho_1, \delta_1, \phi_1}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ 为:

$$f_{\rho_1, \delta_1, \phi_1}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{x^{M-1} e^{-\frac{x}{\lambda_M}} \prod_{i=1}^{M-1} e^{-\frac{xy_i(1-\frac{\lambda_i}{\lambda_M})}{\lambda_i}}}{(2\pi)^M \lambda_1 \dots \lambda_M} \quad (20)$$

证明: 考虑 $1 \times M$ 维均值为 $\mathbf{0}$ 协方差矩阵为 \mathbf{R} 的复高斯随机向量 \mathbf{h} 。设 $\mathbf{h} = [\sqrt{\xi_1} e^{j\phi_1}, \dots, \sqrt{\xi_M} e^{j\phi_M}]$, 且 $\rho = \|\mathbf{h}\|^2 = \sum_{m=1}^M \xi_m$, 则 ρ 、 ξ 和 ϕ 的联合概率密度函数为^[18]:

$$f_{\rho, \xi, \phi}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_M}} \prod_{i=1}^{M-1} e^{-\frac{xy_i(1-\frac{\lambda_i}{\lambda_M})}{\lambda_i}}}{(2\pi)^M \lambda_1 \dots \lambda_M} \quad (21)$$

其中, $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_{M-1}]$, $\phi = [\phi_1, \dots, \phi_M]$, λ_i 是协方差矩阵 \mathbf{R} 的特征值, $\lambda_i \neq \lambda_j$, $i, j = 1, \dots, M$ 。

对于基于穷举搜索的调度算法, \mathbf{v}_1 是任意用户的信道向量, 即是均值为 $\mathbf{0}$ 协方差矩阵为 \mathbf{R} 的复高斯随机向量。同时, 考虑到 $\delta_{1,m} = \xi_{1,m} / \rho_1$, 则通过换元法不难得到:

$$f_{\rho_1, \delta_1, \phi_1}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = x^{M-1} f_{\rho, \xi, \phi}(x, x\mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (22)$$

即如(20)式所示。

引理 2: 在基于串行搜索的多用户调度中, K 个用户的信道向量的欧式范数平方的最大值 ρ_2 的累积分布函数和概率密度函数分别为:

$$F_{\rho_2}(x) = \left(\prod_{i=1}^M \prod_{j \neq i} \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-1} \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_i}} \right) \right)^K \quad (23)$$

$$f_{\rho_2}(x) = K \left(\sum_{i=1}^M \prod_{j \neq i} \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-1} \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_i}} \right) \right)^{K-1} \sum_{i=1}^M \prod_{j \neq i} \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-1} \frac{1}{\lambda_i} e^{-\frac{x}{\lambda_i}} \quad (24)$$

证明: 考虑 $1 \times M$ 维均值为 $\mathbf{0}$ 协方差矩阵为 \mathbf{R} 的复高斯随机向量 \mathbf{h} , $\rho = \|\mathbf{h}\|^2$, 则 ρ 的概率密度函数为^[19]:

$$f_{\rho}(x) = \sum_{i=1}^M \prod_{j \neq i} \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-1} \frac{1}{\lambda_i} e^{-\frac{x}{\lambda_i}} \quad (25)$$

由(25)式不难得出 ρ 的累积分布函数为:

$$F_{\rho}(x) = \sum_{i=1}^M \prod_{j \neq i} \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i} \right)^{-1} \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_i}} \right) \quad (26)$$

[20] 给出了 K 个随机变量的最大值的累积分布函

数。由此可得, ρ_2 的累积分布函数 $F_{\rho_2}(x) = F_{\rho}^K(x)$, 即如(23)式所示。同时, 通过对(23)式进行求导可以得到 ρ_2 的概率密度函数如(24)式所示。

推论 1: 在基于串行搜索的多用户调度中, 与 \mathbf{v}_2 对应的 ρ_2 、 δ_2 和 ϕ_2 的联合概率密度函数 $f_{\rho_2, \delta_2, \phi_2}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ 为:

$$f_{\rho_2, \delta_2, \phi_2}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = f_{\rho_2}(x) f_{\delta_2, \phi_2 | \rho_2}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) \quad (27)$$

其中, $f_{\delta_2, \phi_2 | \rho_2}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) = f_{\delta, \phi | \rho}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{x^{M-1} f_{\rho, \xi, \phi}(x, x\mathbf{y}, \mathbf{z})}{f_{\rho}(x)}$ 是给定 ρ_2 时 δ_2 和 ϕ_2 的条件联合概率密度函数, $f_{\rho, \xi, \phi}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z})$ 由(21)式给出, $f_{\rho}(x)$ 由(25)式给出, $f_{\rho_2}(x)$ 由(24)式给出。

定理 1: 当 $M=2$ 时, $\sin^2 \theta_i$ 的概率密度函数为:

$$f_{\sin^2 \theta_i}(x) = \int_0^1 \alpha_i \frac{(1-\varrho) a_1 a_2}{((a_1 - a_2)x + a_2)^2} \left(1 - \frac{4\varrho a_1 a_2 x(1-x)}{((a_1 - a_2)x + a_2)^2} \right)^{\frac{3}{2}} d\delta_{i,1} \quad (28)$$

其中, $a_1 = (\lambda_1 - \lambda_2)\delta_{i,1} + \lambda_2$, $a_2 = (\lambda_2 - \lambda_1)\delta_{i,1} + \lambda_1$, $\varrho = (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \delta_{i,1} (1 - \delta_{i,1}) / (a_1 a_2)$, $\alpha_i = f_{\delta_i}(\delta_{i,1}) = \int_{x, \mathbf{z}} f_{\rho_i, \delta_i, \phi_i}(x, \delta_{i,1}, \mathbf{z}) dx d\mathbf{z}$, $i=1, 2$, 可以表示为:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{((\lambda_2 - \lambda_1)\delta_{i,1} + \lambda_1)^2} \quad (29)$$

$$\alpha_2 = \int_0^{\infty} \frac{Kxe^{-x\left(\frac{1}{\lambda_2} + \delta_{2,1}\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right)}}{\lambda_1 \lambda_2} \left(1 + \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(-\lambda_1 e^{-\frac{x}{\lambda_1}} + \lambda_2 e^{-\frac{x}{\lambda_2}} \right) \right)^{K-1} dx \quad (30)$$

证明: 当 $M=2$ 时, 由引理 1 和推论 1 给出的 ρ_i 、 ξ_i 和 ϕ_i 的联合概率密度函数可以简化为:

$$f_{\rho_1, \delta_1, \phi_1}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{xe^{-x\left(\frac{1}{\lambda_2} + y_1\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right)}}{(2\pi)^2 \lambda_1 \lambda_2} \quad (31)$$

$$f_{\rho_2, \delta_2, \phi_2}(x, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{Kxe^{-x\left(\frac{1}{\lambda_2} + y_1\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right)\right)}}{(2\pi)^2 \lambda_1 \lambda_2} \left(1 + \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(-\lambda_1 e^{-\frac{x}{\lambda_1}} + \lambda_2 e^{-\frac{x}{\lambda_2}} \right) \right)^{K-1} \quad (32)$$

同时, 文献[17]给出的 \mathbf{q}_i 的条件概率密度函数 $f_{\mathbf{q}_i | \rho_i, \delta_i, \phi_i}(\mathbf{x})$ 可以简化为:

$$f_{\mathbf{q}_i | \rho_i, \delta_i, \phi_i}(\mathbf{x}) = \frac{e^{-\frac{1-\varrho}{1-\varrho} \left(\frac{x_1}{a_1} + \frac{x_2}{a_2} \right)}}{(1-\varrho) a_1 a_2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\varrho^i x_1^i x_2^i}{i! i! (1-\varrho)^{2i} a_1^i a_2^i} \quad (33)$$

将(31)式、(32)式和(33)式代入(19)式, 可以分别得到 \mathbf{q}_1 和 \mathbf{q}_2 的联合概率密度函数 $f_{\mathbf{q}_i}(\mathbf{x})$ 。将 $f_{\mathbf{q}_i}(\mathbf{x})$

代入(18)式,不难得出 $\sin^2\theta_i$ 的概率密度函数如(28)式所示。

3.2 数值分析

根据前文的分析, θ_1 和 θ_2 分别体现了基于穷举搜索和基于串行搜索的调度算法对所选用户正交性的影响。下面通过数值计算分析 θ_1 和 θ_2 在不同空间相关性和系统总用户数下的差异。

图1给出了不同信道空间相关性下 $\sin^2\theta_1$ 和 $\sin^2\theta_2$ 的概率密度函数。可以看出,对于i.i.d.信道,即 $\lambda_1/\lambda_2=1$, $\sin^2\theta_1$ 和 $\sin^2\theta_2$ 均在区间 $[0,1]$ 内服从均匀分布,这与[21]的研究结果相符。然而,对于空间相关信道,即 $\lambda_1/\lambda_2>1$,在统计意义上 $\sin^2\theta_2$ 小于 $\sin^2\theta_1$ 。图2给出了不同总用户数 K 下 $\sin^2\theta_1$ 和 $\sin^2\theta_2$ 的概率密度函数。可以看出,在空间相关信道下, $\sin^2\theta_2$ 与 $\sin^2\theta_1$ 之间的差距随着总用户数 K 的增加而增大。因此,相对于统计独立信道,信道的空间相关性将增大基于串行搜索的调度算法与基于穷举搜索的调度算法之间的性能差距。我们将在第5节通过蒙特卡洛仿真验证这一结论。在下一节,我们提出一种基于交替搜索的低复杂度多用户调度算法,它能够在空间相关信道下获得接近穷举搜索的性能。

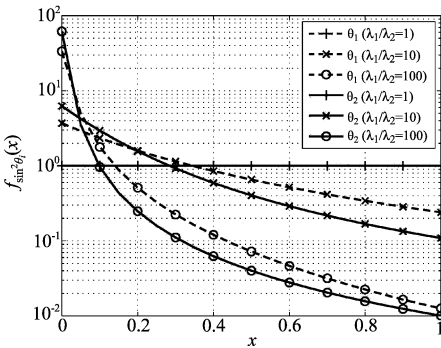


图1 不同空间相关性下 $\sin^2\theta_i$ 的概率密度函数, $K=10$

Fig.1 The probability density function (PDF) of $\sin^2\theta_i$ in different spatially correlated channels, $K=10$

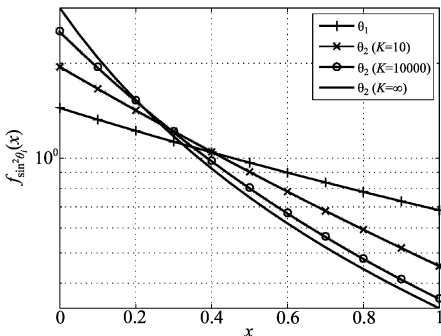


图2 不同用户数 K 下 $\sin^2\theta_i$ 的概率密度函数, $\lambda_1/\lambda_2=3$

Fig.2 The PDF of $\sin^2\theta_i$ for different user number K , $\lambda_1/\lambda_2=3$

4 交替多用户调度算法

4.1 交替多用户调度算法

交替多用户调度算法(Alternating user scheduling, AUS)的设计思想是在现有基于串行搜索的多用户调度算法(包括GUS和SUS)的基础上对调度结果进行交替更新。交替搜索是一种多变量优化问题的松弛算法^[16],能够以较低的计算复杂度获得渐近最优的性能。尽管所提出的AUS不能保证在每次信道实现下均得到全局最优的调度结果,但是通过选择恰当搜索初值,AUS能够有效地减少这一情况发生的概率。例如,我们采用GUS或SUS的调度结果作为AUS的搜索初值。

AUS是一种迭代的多用户调度算法。在每一次迭代过程中,AUS通过 M 个步骤分别对已选出的 M 个用户进行更新。设在第 i 次迭代中, $\mathcal{T}_0=\{1,\dots,K\}$ 表示所有候选用户集合, $\mathcal{S}=\{s_1,\dots,s_M\}$ 表示已选出的用户集合,则在本次迭代的第 m 步中用户 s_m 被更新为:

$$s_m = \arg \max_{k \in \mathcal{T}_{im}} R(\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}) \quad (34)$$

其中, $\mathcal{S}_{im}=\{k \in \mathcal{S}, k \neq s_m\}$, $\mathcal{T}_{im}=\{k \in \mathcal{T}_0, k \notin \mathcal{S}_{im}\}$ 。在完成对 M 个用户的更新之后,计算相应的和数据率,记为 $R_i=R(\mathcal{S})$ 。

在(34)式中,为了得到多用户的和数据率 $R(\mathcal{S}_{im} \cup \{k\})$,系统需要计算ZF波束形成矩阵 $\mathbf{G}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}$,其中包含的矩阵求逆运算会导致很高的计算复杂度。下面我们采用分块矩阵求逆引理^[16]来简化这一过程的复杂度。

定义 $\mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}} = [\mathbf{h}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_{m-1}}^H, \mathbf{h}_{s_{m+1}}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_M}^H, \mathbf{h}_k^H]^H = [\mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}}^H, \mathbf{h}_k^H]^H$,则 $\mathbf{G}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}$ 可以表示为:

$$\mathbf{G}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}} = \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^H (\mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}} \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^H)^{-1} = \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^H \Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^{-1} \quad (35)$$

为了简化求逆运算 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 的复杂度,我们采用分块矩阵的形式将 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}$ 表示为:

$$\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}} \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}}^H & \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}} \mathbf{h}_k^H \\ \mathbf{h}_k \mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}}^H & \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathcal{S}_{im}} & \mathbf{t}_k \\ \mathbf{t}_k & \beta_k \end{bmatrix} \quad (36)$$

则可以得到 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 为:

$$\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^{-1} = \begin{bmatrix} \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} + \alpha_k \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} \mathbf{t}_k \mathbf{t}_k^H \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} & -\alpha_k \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} \mathbf{t}_k^H \\ -\alpha_k \mathbf{t}_k \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} & \alpha_k \end{bmatrix} \quad (37)$$

其中, $\alpha_k = (\beta_k - \mathbf{t}_k \Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1} \mathbf{t}_k^H)^{-1}$ 。

可见,若已知 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1}$,则计算 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 将只包含简单的矩阵-矢量相乘运算。注意到 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im}}$ 是 $\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H$ 的子矩阵,因此 $\Sigma_{\mathcal{S}_{im}}^{-1}$ 可以由 $(\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1}$ 得到,具体过程如下。

设 Γ_m 为行置换矩阵,它将 \mathbf{H}_S 变换为:

$$\Gamma_m \mathbf{H}_S = [\mathbf{h}_{s_1}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_{m-1}}^H, \mathbf{h}_{s_{m+1}}^H, \dots, \mathbf{h}_{s_M}^H, \mathbf{h}_{s_m}^H]^H = [\mathbf{H}_{\mathcal{S}_{im}}^H, \mathbf{h}_{s_m}^H]^H \quad (38)$$

由此可得:

$$\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H = \mathbf{\Gamma}_m^T \begin{bmatrix} \sum_{S_{im}} \mathbf{t}_{s_m}^H \\ \mathbf{t}_{s_m} \\ \beta_{s_m} \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_m \quad (39)$$

其中, $\mathbf{t}_{s_m} = \mathbf{h}_{s_m} \mathbf{H}_{S_{im}}^H$, $\beta_{s_m} = \mathbf{h}_{s_m} \mathbf{h}_{s_m}^H$ 。因此, $(\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1}$ 可以表示为:

$$\begin{aligned} (\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1} &= \mathbf{\Gamma}_m^T \begin{bmatrix} \sum_{S_{im}}^{-1} + \alpha_{s_m} \sum_{S_{im}}^{-1} \mathbf{t}_{s_m}^H \mathbf{t}_{s_m} \sum_{S_{im}}^{-1} & -\alpha_{s_m} \sum_{S_{im}}^{-1} \mathbf{t}_{s_m}^H \\ -\alpha_{s_m} \mathbf{t}_{s_m} \sum_{S_{im}}^{-1} & \alpha_{s_m} \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_m \\ &= \mathbf{\Gamma}_m^T \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{a}^H \\ \mathbf{a} & a \end{bmatrix} \mathbf{\Gamma}_m \end{aligned} \quad (40)$$

其中, $\alpha_{s_m} = (\beta_{s_m} - \mathbf{t}_{s_m} \sum_{S_{im}}^{-1} \mathbf{t}_{s_m}^H)^{-1}$ 。

作为 \mathbf{G}_S 的组成部分, $(\mathbf{H}_S \mathbf{H}_S^H)^{-1}$ 在基于 GUS 或 SUS 的初始化过程中已经给出,则在(40)式两端乘以 $\mathbf{\Gamma}_m$ 和 $\mathbf{\Gamma}_m^T$ 可以分别得到其中的 \mathbf{A} , \mathbf{a} 和 a ,并可以进一步得到 $\sum_{S_{im}}^{-1}$ 为:

$$\sum_{S_{im}}^{-1} = \mathbf{A} - \mathbf{a}^H \mathbf{a} / a \quad (41)$$

将(41)式代入(37)式和(35)式,可以分别得到 $\sum_{S_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 和 $\mathbf{G}_{S_{im} \cup \{k\}}^{-1}$,从而能够以较低的复杂度计算(34)式中的多用户和数据率 $R(S_{im} \cup \{k\})$ 。

综上所述,所提出的 AUS 调度算法的具体实现过程可以总结如下:

(1) 初始化: 将 GUS^[2] 或 SUS^[6] 的调度结果作为 AUS 的初始值,记为 $\mathcal{S} = \{s_1, \dots, s_M\}$, 其对应的和数据率为 $R_0 = R(\mathcal{S})$, 设 $i=1$ 。

(2) 交替更新: 通过交替搜索对已选用户 \mathcal{S} 进行更新。

a) 通过 M 个步骤对 \mathcal{S} 中的 M 个已选用户进行更新。在第 m 步中,根据(34)式对 \mathcal{S} 中的 s_m 进行更新, $m=1, \dots, M$, 其中采用(41)式、(37)式和(35)式计算和数据率 $R(S_{im} \cup \{k\})$ 。在完成对 M 个用户的更新之后,重新计算 $R_i = R(\mathcal{S})$, 并更新 $i=i+1$ 。

b) 重复步骤 a, 直至 $R_i - R_{i-1} \leq \epsilon$, 其中 ϵ 是特定的门限值。

4.2 复杂度分析

下面我们分析穷举搜索、GUS、SUS、基于 GUS 的 AUS 和基于 SUS 的 AUS 五种调度算法的计算复杂度。这里我们以复乘次数作为复杂度衡量指标。

在穷举搜索中,对每一种可能的用户组合计算和数据率包含 $O(M^3)$ 次复乘运算,这主要来自于计算 ZF 波束形成矩阵 \mathbf{G}_S 。考虑到穷举搜索算法的搜索空间为 C_k^M , 因此其计算复杂度为 $O(C_k^M M^3)$ 。GUS 采用了串行搜索的方式将搜索空间减小为 $\sum_{m=1}^M K+1-m \approx O(KM)$, 因此其计算复杂度为 $O(KM^4)$ 。与 GUS 不同, SUS 在每一次搜索过程中只需计算待选用户信道向量到已选用户信道向量构成的子空间上的正交投影,这只包

含 $O(M)$ 次复乘运算^[6]。因此, SUS 的计算复杂度为 $O(KM^2)$ 。在 GUS 或 SUS 的基础上, AUS 需要对 M 个已选用户进行交替更新,并且每个用户的更新空间为剩余的 $K-M$ 个用户。AUS 采用(34)式对每个用户进行更新,其复杂度主要来自计算 ZF 波束形成矩阵 $\mathbf{G}_{S_{im} \cup \{k\}}$, 如(35)式所示,其中采用本文所提出的低复杂度算法能够将计算 $\sum_{S_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 的复杂度降为 $O(M^2)$, 而矩阵相乘 $\mathbf{H}_{S_{im} \cup \{k\}}^H \sum_{S_{im} \cup \{k\}}^{-1}$ 的复杂度为 $O(M^3)$ 。因此,在 AUS 中交替更新的复杂度为 $O(iKM^4)$, 其中 i 是 AUS 算法的交替搜索次数。由此可得,基于 GUS 和 SUS 的 AUS 的复杂度分别为 $O((i+1)KM^4)$ 和 $O(iKM^4)$ 。表 1 总结了以上五种调度算法的计算复杂度。

表 1 五种调度算法的计算复杂度

Tab.1 Computational complexity of five scheduling algorithms

调度算法	复乘次数
穷举搜索	$O(C_k^M M^3)$
GUS	$O(KM^4)$
SUS	$O(KM^2)$
GUS-based AUS	$O((i+1)KM^4)$
SUS-based AUS	$O(iKM^4)$

* i 是 AUS 算法的交替搜索次数, $i \geq 1$

交替搜索次数对 AUS 的计算复杂度有很大的影响,它依赖于 AUS 所采用的初始调度结果以及门限 ϵ 。下节的仿真结果表明,采用 GUS 或 SUS 的调度结果作为搜索初值能够有效地提高 AUS 的收敛速度,通常情况下只进行一次交替搜索即可充分实现 AUS 的性能潜力。

5 仿真分析

下面我们通过蒙特卡洛仿真对以上四种多用户调度算法进行性能分析,其中包括穷举搜索、GUS、SUS 和 AUS。在仿真中,设基站有 $M=8$ 个天线,并基于所有用户的准确信道信息采用 ZF 预编码服务 M 个单天线用户。我们把空间独立信道建模为 i.i.d. 瑞利衰落信道,其元素是零均值单位方差的复高斯随机变量。对于空间相关信道,我们采用虚拟信道模型^[22]进行建模,其中天线间距设为 0.5 倍波长,所有用户的平均发射角在一个扇区内服从 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 上的均匀分布,每条信道包含 50 条子信道,其角度扩展为 15° 。所有仿真结果都是在进行 100 次蒙特卡洛实验后得到的。

图 3 给出了空间相关性对四种多用户调度算法性能的影响。可以看出,与空间独立信道相比,空间相关性降低了所有调度算法的性能。同时,如第 3 节所指出的,空间相关性扩大了基于串行搜索的调度算法(包括 GUS 和 SUS)与穷举搜索之间的性能差距。所提出的 AUS 算法有效地弥补了 GUS 和 SUS 的性能损失,无

论在空间独立信道还是空间相关信道中均能够获得接近穷举搜索的最优性能。

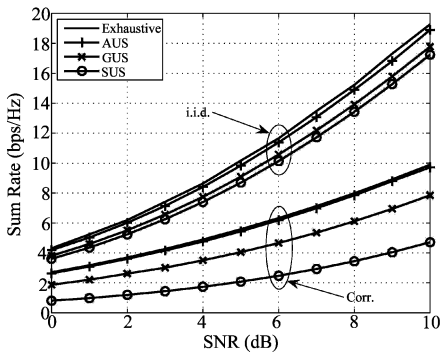


图3 不同信噪比下四种调度算法的和数据率,其中 AUS 采用 GUS 的调度结果作为初始值,门限设为 $\epsilon=0$,分别考虑空间独立信道 (i.i.d.) 和空间相关信道 (Corr.),总用户数为 $K=16$ 。

图中“Exhaustive”表示穷举搜索

Fig. 3 Sum rate of the four scheduling algorithms for different SNR in both i.i.d. channels and spatially correlated channels (Corr.), where AUS is initialized by the scheduling results of GUS, $\epsilon=0$, and $K=16$

在 AUS 算法中,门限 ϵ 同时影响着 AUS 的和数据率和计算复杂度。为了分析门限 ϵ 这两方面的影响,在图4中我们考虑了 $\epsilon=0$ 和 $\epsilon=\infty$ 两种极端情况,它们分别对应着最大的交替搜索次数和只进行一次交替搜索,相应的和数据率分别记为 R_0 和 R_∞ 。可以看出,只进行一次交替搜索的 AUS (R_∞) 即可有效地提高 GUS 和 SUS 的性能,并且可以获得接近 R_0 的性能。注意到基于 GUS 和基于 SUS 的 AUS 具有相近的和数据率,因此通常可以采用 SUS 的调度结果作为 AUS 的初始值,并只进行一次交替搜索。由此得到的 AUS 具有与 GUS 相同的计算复杂度,且能够获得接近最优的性能。

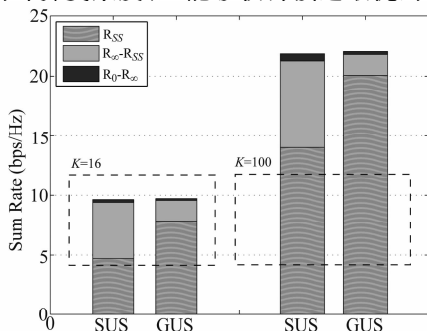


图4 空间相关信道下两种极端门限值 ϵ 对应的 AUS 和数据率,其中 AUS 分别采用 SUS 和 GUS 的调度结果作为初始值,总用户数为 $K=16$ 和 100 ,信噪比为 10 dB。在图例中 R_{SS} 表示基于串行搜索调度算法的和数据率,包括 GUS 和 SUS

Fig. 4 Sum rate of AUS for two extreme thresholds ϵ in spatially correlated channels, where AUS is initialized by the scheduling results of SUS and GUS, respectively, $K=16$ and 100 , and the SNR is 10 dB. In the legend, R_{SS} denotes the sum rate of the successive searching algorithms including GUS and SUS

6 结束语

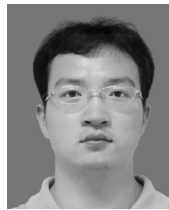
本文研究了多用户 MIMO 系统空间相关信道下的多用户调度问题。针对基于穷举搜索和基于串行搜索的调度算法的每一种可能的用户组合,我们推导了组合内两个用户信道向量夹角的概率分布。研究表明,在空间相关信道下,基于串行搜索的调度算法所选择的用户在统计意义上正交性较差,导致基于串行搜索的调度算法与穷举搜索之间存在较大的性能差距。为此,我们进一步提出了基于交替搜索的多用户调度算法 AUS,并研究了 AUS 的低复杂度实现方式。在空间相关信道下,AUS 能够以与 GUS 相同的计算复杂度有效地提高 GUS 和 SUS 的性能,并且能够获得接近穷举搜索算法的最优性能。

参考文献

- [1] GESBERT D, KOUNTOURIS M, HEATH JR R, et al. Shifting the MIMO paradigm: from single user to multiuser communications [J]. IEEE Signal Processing Mag., 2007, 24:36-46.
- [2] DIMIC G, SIDIROPOULOS N. On downlink beamforming with greedy user selection: performance analysis and a simple new algorithm [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2005, 53:3857-3868.
- [3] WANG L, YEH C. Scheduling for multiuser MIMO broadcast systems: transmit or receive beamforming? [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2010, 9:2779-2791.
- [4] HOUMAN S, GIUSEPPE C, MICHAEL J N. MIMO downlink scheduling with non-perfect channel state knowledge [J]. IEEE Trans. Commun., 2010, 58:2055-2066.
- [5] AJIB W, HACCOUN D. An overview of scheduling algorithms in MIMO-based fourth-generation wireless systems [J]. IEEE Network, 2005, 19: 43-48.
- [6] YOO T, GOLDSMITH A. On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming [J]. IEEE J. Select. Areas Commun., 2006, 24: 528-541.
- [7] FUCHS M, DELGALDO G, HAARDT M. Low complexity space-time-frequency scheduling for MIMO systems with SDMA [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2007, 56:2775-2784.
- [8] WANG J Q, LOVE D J, ZOLTOWSKI M D. User selection with zero-forcing beamforming achieves the asymptotically optimal sum rate [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2008, 56:3713-3726.
- [9] BOCCARDI F, HUANG H. Zero-forcing precoding for the MIMO broadcast channel under per-antenna power constraints [C]. Proceedings of IEEE Signal Processing Ad-

- vances in Wireless Communications (SPAWC), 2006.
- [10] SHARIF M, HASSIBI B. On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2005, 51:506-522.
- [11] LEADBETTER M R. Extreme value theory under weak mixing conditions [J]. Stud. Probab. Theory, MAA Stud. Math., 1978. 46-110.
- [12] ZHANG X, JORSWIECK E, OTTERSTEN B, PAULRAJ A. On the optimality of opportunistic beamforming with hard SINR constraints[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2009.
- [13] XU W, ZHAO C, DING Z. Limited feedback multiuser scheduling of spatially correlated broadcast channels[J]. IEEE Trans. Veh. Technology, 2009, 58:4406-4418.
- [14] HUANG Y, YANG L, BENGTTSSON M, OTTERSTEN B. Exploiting long-term channel correlation in limited feedback SDMA through channel phase codebook[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2011, 59:1217-1228.
- [15] WIESEL A, EL-DAR Y C, SHAMAI S. Zero-forcing precoding and generalized inverses[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2008, 56:4409-4418.
- [16] TREES H L V. Optimum array processing: Part IV of detection, estimation and modulation theory[M]. New York: Wiley, 2002.
- [17] HAN S Q, Yang C Y, Bengtsson M. Channel norm-based user scheduling exploiting channel asymmetry in base station cooperative transmission systems[J]. Preprint, 2010, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1005.4985>.
- [18] HAMMARWALL D, BENGTTSSON M, OTTERSTEN B. Acquiring partial CSI for spatially selective transmission by instantaneous channel norm feedback [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2008, 56:1188-1204.
- [19] ZHENG J, RAO B D. Analysis of multiple antenna systems with finite-rate channel information feedback over spatially correlated fading channels[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2007, 55:4612-4626.
- [20] PAPOULIS A, PILLAI S U. Probability, random variables, and stochastic processes [M]. New York: McGraw-Hill, fourth edition, 2002.
- [21] ROH J, RAO B. Transmit beamforming in multiple antenna systems with finite rate feedback: A VQ-based approach [J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2006, 52:1101-1112.
- [22] SAYEED A. Deconstructing multiantenna fading channels [J]. IEEE Trans. Signal Processing, 2002, 50:2563-2579.

作者简介



韩圣千(1981-),男,山东威海人,博士,北京航空航天大学博士后。主要研究方向为多天线系统及多小区协作通信中的信号处理。

E-mail:sqhan@ee.buaa.edu.cn



杨晨阳(1965-),女,浙江杭州人,博士,北京航空航天大学教授,博士生导师。主要研究方向为协作通信、绿色通信、多天线系统以及认知无线电中的信号处理。