

5G 通信中基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法研究^①

徐顺清^② * * * * * 石晶林 * * * * * 张宗帅 * * * * * 龙 隆 * * * * * 任俊威 * * * * *

(* 移动计算与新型终端北京市重点实验室 北京 100190)

(** 中国科学院计算技术研究所无线通信技术研究中心 北京 100190)

(*** 中国科学院大学 北京 100049)

(**** 中国三星研究院 北京 100028)

摘 要 大规模多输入多输出(MIMO)技术是 5G 通信的核心技术之一,信号多入多出可以有效提高通信传输中的频谱效率与用户的通信质量。本文从用户下行信道与通信向量函数 2 个维度阐述了信道有效传输原理,并基于此设计了一种毫米波 MIMO 混合波束成型模型。文章分析了毫米波混合波束成型模型设计原理、实现步骤及算法复杂度情况,并利用混合波束成型模型设计了多用户 MIMO 调度的具体实现方法;基于模型确定出双向交替优化 MIMO 系统的发射端和接收端子阵列的天线加权矢量,给出数字模拟混合波束成型的算法方案,最终实现多用户 MIMO 的均衡调度。仿真结果表明,所提出的调度算法具有收敛速度快、计算复杂度低、基带传输效率高等优势。

关键词 5G 通信;混合波束;多用户;大规模多输入输出(MIMO);调度算法

0 引 言

当前全球移动通信技术已经步入了 5G 时代,与 4G 移动网络相比,5G 通信在信息传输与接收速率、通信质量及移动网络性能上都有了质的飞跃^[1,2],5G 通信能够给移动网络的使用者带来更加流畅的使用体验。传统多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)系统仅在基站中配备了少量的天线,进而实现通信信息的小规模传输^[3]。从传统 MIMO 技术的分类可知,MIMO 具体包括空间分集^[4]与波分复用^[5],信号的预编码及波束的赋型^[6,7]。尽管传统 MIMO 技术在现阶段仍拥有一定的技术优势,但由于其发射基站端配备的天线数量较少,限制了移动通信网络的基础性能,也无法满足 5G 通信的基本要求。随着工业技术和通信产业的发展 and 进步,目前基站天线的数量可以增加到几十

根甚至上百根,移动接收终端的天线数量也在不断增加。由于天线数量的增加使多用户 MIMO 的阵列更为先进,通信信号质量也更加稳定。大规模 MIMO 技术是 5G 移动通信的核心与关键技术^[8-10],使用该项技术能够极大改善无线通信中信号的频谱效率,提高信息传输与接收的质量与稳定性。

而在大规模 MIMO 技术的实际应用与落地环节中,基于混合波束成型技术的多用户大规模 MIMO 调度算法至关重要。尽管传统毫米波单输入单输出(single input single output, SISO)技术中的通信信号传输^[11,12]也可以支持多通道数据流信息的同时传输,但随着通信网络密集程度、负载强度的提高、及用户对于通信网络质量的追求,多用户大规模 MIMO 的推广使用呼之欲出。空间通信中用户之间的通信干扰实时存在^[13],多用户 MIMO 技术及基于混合波束成型的调度算法的终极目的,就是要通过

① 国家自然科学基金(61571425)和北京市自然科学基金(L172049)资助项目。
② 男,1987 年生,博士生;研究方向:无线通信,信号处理;联系人,E-mail: xushunqing228@163.com
(收稿日期:2019-08-21)

合理的数据调度改善通信系统中频谱效率过低的不足,并在保证用户通信质量的前提下,同时处理和服务多个共享通信资源的网络用户,并兼顾用户之间的公平性^[14]。本文在研究大规模 MIMO 的传输原理和毫米波混合波束成型模型设计原理的基础上,提出了一种混合波束成型算法,并基于该模型确定出双向交替优化发射端和接收端子阵列的天线加权矢量;以通信周期为基准,基于模型设置的门限值调度网络资源,实现了多用户 MIMO 通信中网络用户的分级增益与通信公平性的均衡。

1 5G 通信中大规模 MIMO 有利传输原理

假定 5G 通信系统中,基站和接收终端安装的天线数量分别为 N_{BS} 和 N_{MS} , N_s 个数据流通过全数字预编码器处理后发送到接收终端,其传输模型如图 1 所示。

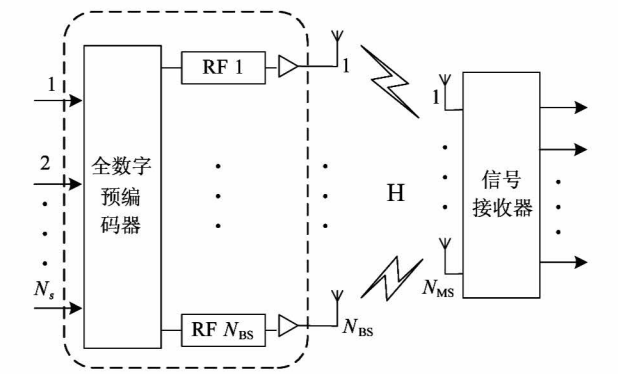


图 1 全数字波束成形系统传输模型

在全数字波束成形预编码算法中,通常可以对信道矩阵进行奇异值分解(singular value decomposition, SVD),得到系统的预编码矩阵为 $\mathbf{H}$ 。以消除系统中的干扰,从而提高系统性能^[15]。随着天线数目的增加用于波束赋形的链路数量也需要相应增加,为了控制硬件成本的投入,将空间信号转移到模拟域处理是最优的选择,混合波束赋形系统的阵列形态结构图,如图 2 所示。

在前端天线与数字波束赋形间加入一级模拟波束赋形降低了通信中的硬件复杂度。经过模拟波束赋形粗匹配后等效通信信道的维度降低,并与射频

(radio frequency, RF)链路保持一致。 $(\cdot)^H$ 表示矩阵的共轭转置, $\mathbf{W}$ 为基站端 $N_{BS} \times N_s$ 阶的数字预编码矩阵。

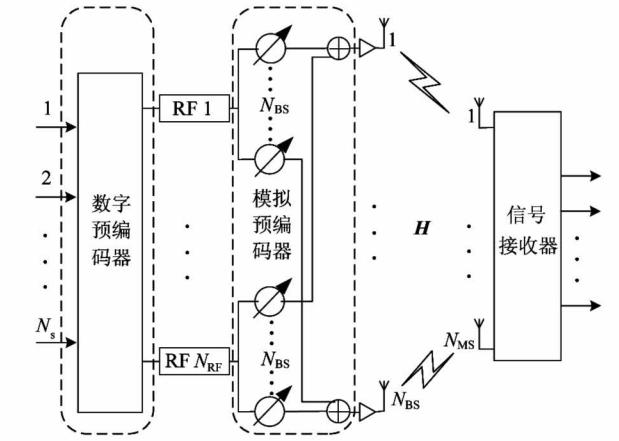


图 2 混合波束成形系统传输模型

信号经由信道传输后,用户终端所接收的信号 r 可以表示为

$$r = \sqrt{P}\mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n} \tag{1}$$

式中, P 表示信号的平均发射功率, $\mathbf{H}$ 表示基站到用户终端之间 $N_{MS} \times N_{BS}$ 阶的信道矩阵, $\mathbf{n}$ 为信道噪声矢量,矢量中每个元素都服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布。

最后,经过数字合成器处理后用户终端最终获得的信号 y 可以表示为

$$y = \sqrt{P}\mathbf{F}^H\mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{F}^H\mathbf{n} \tag{2}$$

式中, $\mathbf{F}$ 表示 $N_{MS} \times N_s$ 阶的数字合成矩阵。

当网络用户端是单天线时信号干扰仅存在于用户之间,而引入 MIMO 多天线后,同一用户信号接收系统的天线模组之间也会存在信号干扰。因此只有在满足有利传输的条件下,才能够同时消除来自于通信用户之间与单一用户通信内部多天线的干扰,有利传输条件可以表示为

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \xi_p(m) \xi_q^H(n) = 0 \quad p \neq q, m \neq n \tag{3}$$

其中, $\mathbf{H}$ 代表信道共轭转置矩阵, $\xi_i(m)$ 为信道共轭转置矩阵 $\mathbf{H}$ 的行向量或列向量函数,式(3)即为纵向有利传输条件下用户大规模 MIMO 无线通信的通用表达式。在大规模 MIMO 的信息传输系统中,通常会认为当基站的天线数 m 数值接近于无限

大时,此时数据传输信道向量出现了正交现象,即数据通信中就出现了一种理想化的状态,达到了有利传输的条件。当信号传输基站中相同用户的内部天线干扰消除时,需要满足如下条件:

$$\text{var}\left\{\lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \xi_p(m) \xi_q^H(n)\right\} = 0 \quad (4)$$

因此在有利传输假定条件下,根据构建的几何模型信道可以得出结论,大规模 MIMO 无线通信系统不仅可以消除通信中用户之间的信号干扰,而且对于同一用户内部天线间的干扰也有很好的抑制作用,能够保持合理的通信容量。

毫米波信道的特性与低频段的微波信道不同,该信道中的有效散射体数量较少,同时信号在传播时自由空间路径损耗较严重,因此,毫米波信道被认为是稀疏的信道^[16]。为了能够体现毫米波信道的这种特性,本文采用如图 3 所示的 Saleh-Valenzuela 集群信道模型,则基站与接收终端之间的信道可以表示为

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{N_{\text{BS}} N_{\text{MS}}}{N_c N_L}} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{l=1}^{N_L} \xi_{il} \boldsymbol{\alpha}_{\text{MS}}(\phi_{il}^{\text{MS}}, \theta_{il}^{\text{MS}}) \boldsymbol{\alpha}_{\text{BS}}^H(\phi_{il}^{\text{BS}}, \theta_{il}^{\text{BS}}) \quad (5)$$

式中, N_c 表示毫米波信道中的集群数量; N_L 表示每个集群所包含的路径传播数量; ξ_{il} 为集群 i 中第 l 条传播路径的增益,并且满足条件 $\xi_{il} \sim \text{CN}(0, \sigma^2)$, $E[\|\mathbf{H}\|_F^2] = N_{\text{BS}} N_{\text{MS}}$; $\boldsymbol{\alpha}_{\text{BS}}(\phi_{il}^{\text{BS}}, \theta_{il}^{\text{BS}})$ 和 $\boldsymbol{\alpha}_{\text{MS}}(\phi_{il}^{\text{MS}}, \theta_{il}^{\text{MS}})$ 分别表示基站端和接收终端的阵列响应矢量,其中 ϕ_{il}^{BS} 和 θ_{il}^{BS} 分别为基站端的离开方位角和仰角, ϕ_{il}^{MS} 和 θ_{il}^{MS} 分别为接收终端的到达方位角和仰角。

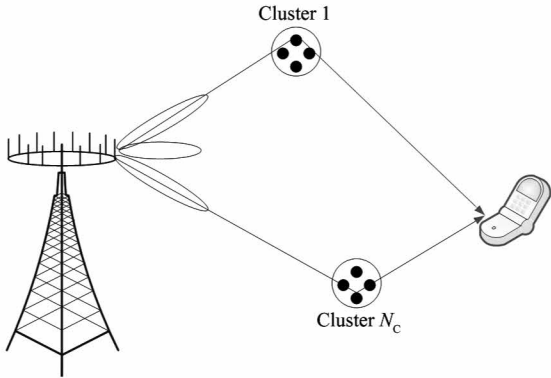


图 3 毫米波信道模型

天线阵列包含多种类型,其中按各天线在阵列中的排列不同,主要可以分为均匀线性阵列(uniform linear array, ULA)和均匀平面阵列(uniform planar array, UPA)2 种,本文主要考虑 UPA 天线阵列。在 UPA 类型的天线阵列中,各天线在水平和垂直 2 个维度上均匀排列,即构成 $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ 的平面阵列,其中 N 表示天线数量,于是系统中基站端和接收终端的天线阵列响应矢量可以分别描述为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_{\text{BS}}(\phi_i^{\text{BS}}, \theta_i^{\text{BS}}) &= \frac{1}{\sqrt{N_{\text{BS}}}} [1, \dots, e^{jkd(\text{psin}\phi_i^{\text{BS}}\text{sin}\theta_i^{\text{BS}} + q\cos\theta_i^{\text{BS}})}, \\ &\dots, e^{jkd((\sqrt{N_{\text{BS}}}-1)\text{psin}\phi_i^{\text{BS}}\text{sin}\theta_i^{\text{BS}} + (\sqrt{N_{\text{BS}}}-1)\cos\theta_i^{\text{BS}})}]^\text{T} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\alpha}_{\text{MS}}(\phi_i^{\text{MS}}, \theta_i^{\text{MS}}) &= \frac{1}{\sqrt{N_{\text{MS}}}} [1, \dots, e^{jkd(\text{psin}\phi_i^{\text{MS}}\text{sin}\theta_i^{\text{MS}} + q\cos\theta_i^{\text{MS}})}, \\ &\dots, e^{jkd((\sqrt{N_{\text{MS}}}-1)\text{psin}\phi_i^{\text{MS}}\text{sin}\theta_i^{\text{MS}} + (\sqrt{N_{\text{MS}}}-1)\cos\theta_i^{\text{MS}})}]^\text{T} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 表示毫米波的波长, d 为天线之间的空间距离,其中 $0 \leq p < \sqrt{N}$, $0 \leq q < \sqrt{N}$ 。

2 毫米波 MIMO 混合波束成型设计

2.1 毫米波混合波束成型的设计

作为现阶段通信领域一种通用的信号传输与数据信息处理技术,波束成型技术主要是通过信号加权处理的方式,将原有的信号波束处理成窄带波束,并将能量汇聚于主要目标用户一点,进而改善了接收用户的通信信噪比,提高了信号传输的质量。毫米波大规模 MIMO 是实现波束成型的主要方式之一,其在无线通信的效率和速度方面,与传统模式相比具有很明显的优势,但在信号传输中毫米波的信道损耗也十分严重,故降低通信中的信道损耗混合波束成型技术是关键。而对于多用户、多天线的通信系统而言,需要实施预编码信息处理来消除用户之间天线的相互干扰。单一的数字波束成型由于信号射频(RF)链路过多,消耗了更多的系统能量;模拟波束成型技术可以避免数字波束成型的不足,但数字传输的约束条件过多,会降低数据传输系统的性能。而将现有的数字波束成型技术与模拟波束成

型技术相结合,形成一种混合波束成型设计,能够规避 2 种传统技术的固有缺点。

考虑到混合波束成型系统总体架构的问题,RF 链路、天线子阵列、系统的模拟相仪器及用户的射频天线都采取一对一的连接方式,数据流传输中先要经过维度为 $N_{RF} \times N_s$ 的数字编码器 $\mathbf{F}_{BB}$ 处理,再经过维度为 $N_{RF} \times N$ 的模拟编码器的 $\mathbf{F}_{RF}$ 处理,由于模拟编码器会受到内部结构和相移器的限制和约束,条件如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{RF} &= \text{diag}\{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_{N_{RF}}\} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{f}_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{f}_{N_{RF}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{f}_i$ 是第 i 个信号发射子阵列的控制矢量。而数字编码器与模拟编码器之间需要满足以下条件:

$$\|\mathbf{F}_{BB} \times \mathbf{F}_{RF}\|^2 \leq N_s \quad (9)$$

在信号的用户接收端,同样配备了 N_{RF} 个天线子阵列,接收的信号由模拟合成器 $\mathbf{H}_{RF}$ 处理,模拟合成器 $\mathbf{H}_{RF}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{RF} &= \text{diag}\{\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_{N_{RF}}\} \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{h}_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \mathbf{h}_{N_{RF}} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{h}_i$ 代表第 i 个子阵列的 AWV (antenna weight vector),混合波束成型设计的目标是使编码器 $\mathbf{F}_{BB}$ 、 $\mathbf{F}_{RF}$ 、 $\mathbf{H}_{RF}$ 与数字合成器 $\mathbf{H}_{BB}$ 联合优化,在数字信号通信信道 G 状态未知的条件下,只有先获得子阵列的 AWV,才能够得到通信信道的等效信息。本文利用接收信号信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 最大化的原理求解子阵列的 AWV,并使接收信号的 SINR 最大,即满足下述条件:

$$\hat{\mathbf{h}}_k = \underset{\mathbf{h}_k}{\text{argmax}} \frac{\mathbf{h}_k^H \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{f}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_k}{\mathbf{h}_k^H (\sum_{i \neq k} \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{f}_k \mathbf{f}_k^H \mathbf{h}_k + \sigma^2 \mathbf{I}) \mathbf{h}_k} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{H}_{k,i}$ 表示发射与接收阵列之间的信道响应阵列。保持接收端天线阵列信号波束方向一致,并使发射信号信干噪比最大,即满足下述条件:

$$\hat{\mathbf{f}}_k = \underset{\mathbf{f}_k}{\text{argmax}} \frac{\mathbf{f}_k^H \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k}{\mathbf{f}_k^H (\sum_{i \neq k} \mathbf{F}_{k,i} \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k + \sigma^2 \mathbf{I}) \mathbf{f}_k} \quad (12)$$

基于 SINR 最大化原理设计的毫米波混合波束成型步骤如下。

步骤 1 系统初始化并固定发射端的 $\mathbf{F}_{RF}$, 优化子阵列 AWV。

步骤 2 得到 $\hat{\mathbf{h}}_k$, 并对相应的接收信号的 SINR 赋值。

步骤 3 固定接收端的 $\mathbf{H}_{RF}$, 并进行相应的赋值。

步骤 4 通过比较通信信号接收端与发射端之间的赋值差与收敛阈值的大小,来决定是否停止系统的迭代。

2.2 算法复杂度分析

由 2.1 节毫米波混合波束成型的设计可知,通过优化模拟合成矩阵 $\mathbf{H}_{RF}$ 和数字预编码矩阵 $\mathbf{F}_{RF}$, 可以得到数据信息传输中下行链路的等效信道 $\hat{G}$:

$$\hat{G} = \mathbf{H}_{RF} \mathbf{G} \mathbf{F}_{RF} \quad (13)$$

在对等效通信信道进行奇异值分解,并以提取到的最大奇异值矢量,作为多用户通道中的预设编码矩阵。本文以 2×2 MIMO 为例分析毫米波混合波束成型的设计复杂度,首先匹配多用户 MIMO 通信接收端与发射端阵列所对应的 AWV,如果能够确定第 1 对阵列可以进行正常的工作,然后依次检测后续的端子阵列,以此类推直到信号匹配工作的完成。实现收发端子阵列匹配的总共训练次数 C_{total} 可以表示为

$$C_{\text{total}} = \sum_{n=0}^{N_t-1} [\zeta_t \zeta_r (N_t - n)] = \zeta_t \zeta_r \sum_{n=0}^{N_t-1} n^2 \quad (14)$$

其中, ζ_t 和 ζ_r 分别为信号发射端码本与接收端码本的天线加权矢量。从总体训练次数的分布情况可知,文中基于 SINR 最大化的混合波束成型设计在总体复杂度方面,还是要优于传统的穷举算法^[17]

$\zeta_t \zeta_r \frac{N_{RF}(N_{RF} + 1)(2N_{RF} + 1)}{n}$ 的计算复杂度。

3 基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法研究

3.1 多用户 MIMO 调度方案设计

多用户 MIMO 数据信息传输模式服务于多用户的数据流,利用预编码技术将待传输的数据流映射

到传输端的天线。由于多用户大规模 MIMO 系统的特点,一次就能够实现多用户的分集信号增益,从而也改善了数据传输系统的基础性能。考虑到多用户 MIMO 混合波束成型结构的非对称性,本文采用比例公平算法设计总体的调度方案。比例公平算法设计的优势在于,既考虑到了通信信道性能衰减带来的信噪比降低问题,还考虑到了多用户同时使用无线网络时带来的分集增益现象,将比例公平算法方案的优先级定义为 ζ_k :

$$\zeta_k = \operatorname{argmax} \frac{\xi_k(t)}{R_k(t)} \tag{15}$$

其中, $\xi_k(t)$ 和 $R_k(t)$ 分别为第 k 个用户在 t 时刻的请求速率和平均数据传输效率。如果一个用户的信道资源被连续调度时,其数据传输的优先级会降低;而用户所处区域的信道质量较差时,其传输效率同样会降低。公平调度方案设计的目的是要实现用户之间信道资源与数据传输、接收的均衡处理。

3.2 混合波束半正交公平调度算法研究

对于毫米波大规模 MIMO 混合波束成型系统而言,在综合通信调度中首要考虑的问题,是在匹配用户和子阵列的基础上,提高系统总体的数据吞吐量。为此,本文在比例公平算法方案的研究基础上,提出了基于 MIMO 系统混合波束的半正交公平调度算法,来实现信道资源占用和信号传输的均衡。在确定的信号调度周期 T 内,按照用户接收信号功率最大化的准则选取出样本用户群,并统计用户被调度的总次数,再基于事先确定好的门限值对被 MIMO 系统调度次数比较少的用户进行集中调度。在信号发射端匹配用户时,归属于基站的子阵列使用码本 B_i 调制波束信号,考虑到波束间的干扰与半正交性,正交的 2 个波束 p_i 与 p_j 满足如下条件:

$$|\langle p_i, p_j \rangle| \leq \tau, \tau \in (0, 1) \tag{16}$$

此时,码本 B_i 由下式生成:

$$B_i = \begin{cases} \{p_i, |\langle p_i, p_j \rangle| \leq \tau\} & p_i, p_{i-1} \in B_{i-1}, i, j \geq 2 \\ B_0 & i = 1 \end{cases} \tag{17}$$

其中, B_0 为系统初始码本,由码本 B_i 与正交波束 p_i 与 p_j , 即可以对子阵列进行混合波束匹配,在降低

天线间干扰的同时,也不增加数据信息传输的总成本。在对多用户进行信号调度时,需要提前设定好门限值,以更好达到均衡、公平调度的最终目的。混合波束半正交公平调度算法有如下几个主要步骤。

步骤 1 确定待调度的用户集合和发射子阵列。

步骤 2 基于码本 B_i 中的码字发射原始信号与接收功率。

步骤 3 确定用户的优先级及匹配用户,并确定出算法的调度周期。

步骤 4 如果存在很多个用户同时满足该条件,则在该调度中优先选择调度次数少的用户。

步骤 5 最后确定用户码字发射信号及对应发射波束。在信号的发射端利用混合波束成型技术与 RF 等效信息,就可以消除大规模 MIMO 系统中多用户数据流之间的相互干扰,大幅度地提高通信的质量。

4 仿真测试

4.1 仿真环境及参数设置

仿真实验场景设定为只有一个小小区,并且该环境内包括一个多天线基站系统。为降低仿真实验的复杂度,全部接收通信信号用户的 SINR 固定为相同的值 r , 其他相关的参数设定如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

项目	参数值
基站下行天线数量	6
基站下行发射功率	240 W
实验环境噪声功率	0.5 W
通信信道选择	瑞利衰落信道
用户数量	20
最大 SINR	28 dB
最小 SINR	4 dB
SINR 最大差值	24 dB

4.2 混合波束成型频谱效率对比

为验证混合波束成型方案的性能,在 RF 链路数分别为 2、4 及 6 的条件下,对比文中提出混合波

束方案与两级优化方案的频谱效率。其他的实现条件包括天线子阵列的数量为 16,码字数量为 32,且满足信号接收链路数与发射链路数相等。不同射频链路下的方案实现频谱效率对比,如图 4 所示。

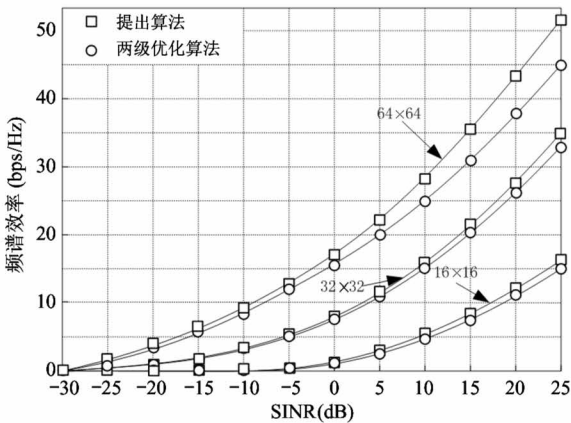


图 4 不同射频(RF)链路下方案的频谱效率对比

如图 4 中的频谱效率曲线变化所示,当 RF 链路数为 2 时,随着信噪比的增加 2 种方案的频谱效率变化接近;而当 RF 链路数为 4,随着信噪比的增加文中提出方案的优势开始显现出来;而当 RF 链路数为 6 时,当信噪比超过 5 时,混合波束成型方案的频谱效率开始显现出来,这表明随着天线阵列数量的不断增加,所提方案具有更好的数据信号传输性能。

4.3 调度算法的性能对比

调度算法的性能仿真对比,从平均接入用户的数量、基站平均最小发射功率和基带传输速率等 3 个指标分别进行对比验证,选择与提出基于混合波束成型多用户 MIMO 算法对比的 2 种调度算法,分别为穷举算法和两级优化算法^[18]。将模型参数的比值因子设定为 1 000,开始对比 3 种算法基本性能,先在不同的 SINR 条件下将用户接入数量对比,如图 5 所示。

当用户的 SINR 需求增加时,多用户 MIMO 系统的资源消耗会增加,如图 5 所示,随着 SINR 值的增加 3 种算法接入用户的数量都在下降,但文中提出算法对于接入用户下降趋势的抑制作用相对于 2 种传统方法更为明显,具有一定的优势,性能表现更优。其次在同样的 SINR 变化条件下,分析 3 种调

度方法下基站平均最小功率的变化情况,如图 6 所示。

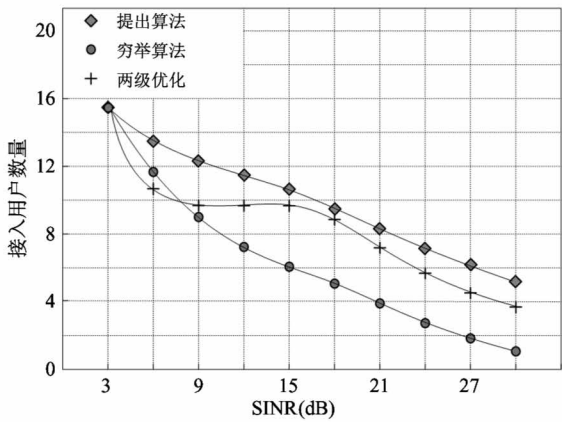


图 5 平均接入用户数量对比

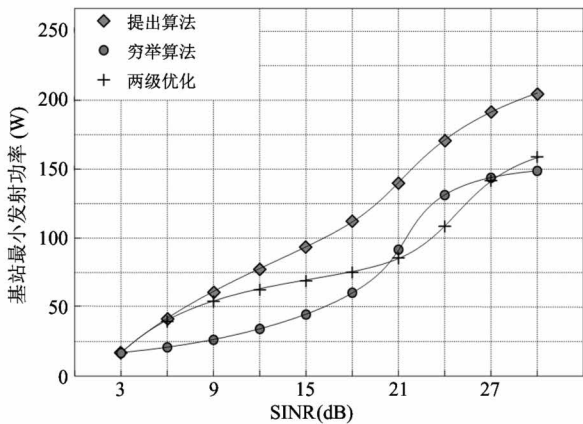


图 6 基站平均最小发射功率变化情况

在 SINR 值持续增加的条件,3 种调度算法的基站发射功率都表现为上升的趋势,但从曲线的走向来分析,文中提出基于混合波束成型技术的调度算法,在相同的 SINR 值下效率最高,且稳定性更好;而两级优化算法出现了明显的波动和反复,穷举算法总体的发射功率和调度效率偏低。第 3 个调度性能对比指标是在码字数为 16 的条件下,对比 3 种不同调度指标的基带传输速率。大规模 MIMO 系统的发射与接收点配置相同数量级的天线子阵列数量,每个子阵列天线都能够生成 6 个待选的混合波束,随机选定射频链路的总数为 4 时,3 种不同算法的基带速率表现如图 7 所示。

与 2 种现有调度算法的基带速率比较,在相同的 SINR 条件下,本文提出调度算法的性能最好。

随着 SINR 数值的增加,算法之间的性能差距也在增加,差距更为明显。综上分析,从平均接入用户的数量、基站平均最小发射功率和基带传输速率等 3 个指标的验证结果可知,文章设计调度算法的总体性能更强,稳定性更高。

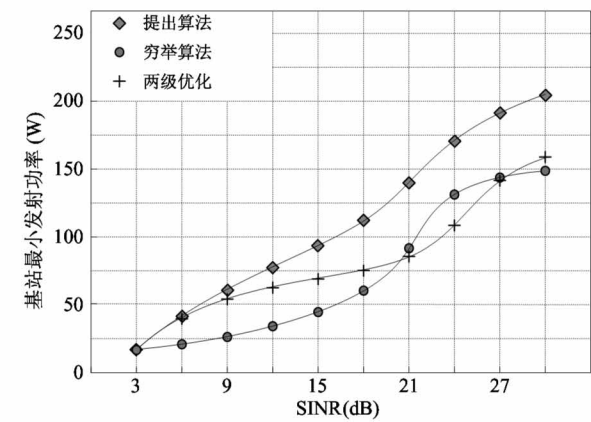


图 7 射频线路既定条件下调度算法基带速率表现

4.4 算法的复杂度对比

调度算法的复杂度是衡量多用户 MIMO 调度算法是否适用的重要因素之一,同样在射频链路为 4 的条件下,统计和计算了不同调度算法的复杂度水平,统计分析结果如表 2 所示。

表 2 不同调度算法的复杂度对比

AWV 数	调度算法复杂度		
	穷举算法	两级优化	本文算法
2 ¹	2 ⁸	120 × 2 ²	48 × 2 ⁰
2 ²	4 ⁸	120 × 2 ⁴	48 × 2 ¹
2 ³	8 ⁸	120 × 2 ⁶	48 × 2 ²
2 ⁴	16 ⁸	120 × 2 ⁸	48 × 2 ³
2 ⁵	32 ⁸	120 × 2 ¹⁰	48 × 2 ⁴
2 ⁶	64 ⁸	120 × 2 ¹²	48 × 2 ⁵

对比数据显示本文提出的算法的复杂度要远远低于现有算法的复杂度,随着用户数量和天线数量的增加这种差距还会不断地增加,由此可以证明在调度算法的可行性和适用性方面,基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法更具优势。

5 结 论

5G 通信时代已经来临,如何在高速无线网络条件下保证通信质量的同时,兼顾通信速率和用户的公平性,已经成为了一个亟待解决的问题。多用户 MIMO 技术是目前 5G 通信的核心技术之一,为此本文提出了基于混合波束成型的通信调度算法,仿真对比结果显示,本文所提算法在综合性能与算法复杂度等方面都具有明显的优势,能够保证多用户 MIMO 通信的顺利实现。

参考文献

[1] 朱思峰, 柴争义, 沈连丰, 等. 5G 异构接入网系统频谱资源的统一化表示及动态分配[J]. 高技术通讯, 2016, 26(12):944-950

[2] 周一青, 孙布勒, 齐彦丽, 等. 面向通信与计算融合的 5G 移动增强/虚拟现实[J]. 电信科学, 2018, 34(8): 19-33

[3] 卢小峰, 朱光喜, 伍仁勇, 等. 基于多用户 MIMO/OFDM 系统的空间子信道分配算法[J]. 通信学报, 2006, 27(9):34-39

[4] 陈业纲, 徐则同. 基于聚类、空间分集和轨迹连续的实时定位算法[J]. 计算机科学, 2015, 42(8):283-287

[5] 钱懿, 林翔宇, 王东, 等. 量子密钥分发和经典光通信波分复用共纤传输研究[J]. 电信科学, 2018, 34(9):54-68

[6] 赵海军, 崔梦天, 陈宇洋. 基于空时块编码和正交脉冲的 MIMO 系统性能研究[J]. 高技术通讯, 2017, 27(3):213-219

[7] 彭吉生, 田霖, 周一青, 等. 有限字符约束下的 MIMO 信道线性预编码设计[J]. 高技术通讯, 2013, 23(11):1117-1123

[8] Bjornson E, Hoydis J, Sanguinetti L. Massive MIMO has unlimited capacity [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(1):574-590

[9] Ngo H Q, Ashikhmin A, Hong Y, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(3):1834-1850

[10] Jacobsson S, Durisi G, Coldrey M, et al. Throughput analysis of massive MIMO uplink with low-resolution

ADCs[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(6):4038-4051

[11] 张超, 尹学锋, 余子明. 粗糙表面毫米波传播信道特性研究及图论建模[J]. *电波科学学报*, 2017(5): 529-535

[12] 周志鹏. 毫米波有源相控阵天线技术[J]. *微波学报*, 2018, 34(1):1-5

[13] 马新迎, 陈智, 马斯, 等. 空间信息网络中毫米波 MIMO 通信系统关键技术[J]. *通信学报*, 2017, 38(z1):179-185

[14] 方志祥, 倪雅倩, 张韬, 等. 利用终端位置时空转移概率预测通讯基站服务用户规模[J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(6):772-781

[15] Ni W, Dong X. Hybrid block diagonalization for massive multiuser MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(1):201-211

[16] Yang R Z, Zong L, Si P B, et al. Selective transmission and channel estimation in massive MIMO systems[J]. *High Technology Letters*, 2016, 22(1):99-106

[17] Yan L Q, Yang H W, Zhang Y S. Beam selection for beam refinement procedure in multi-cell millimeter-wave massive MIMO systems[C] // 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China, Beijing, China, 2018: 32-36

[18] Wang J, Lan Z, Pyo C W, et al. Beamforming codebook design and performance evaluation for 60 GHz wideband WPANs[C] // 2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall, Anchorage, USA, 2009: 437-442

Research on multi-user MIMO scheduling algorithms based on hybrid beam forming in 5G communication

Xu Shunqing^{*****}, Shi Jinglin^{*****}, Zhang Zongshuai^{*****}, Long long^{*****}, Ren Junwei^{****}
(^{*} Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190)
(^{**} Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
(^{***} University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)
(^{****} Samsung Research Institute China-Beijing(SRC-B), Beijing 100028)

Abstract

Massive multi-input and multi-output (MIMO) is one of the core technologies of 5G communication. MIMO signals can effectively improve the spectrum efficiency in communication transmission and the communication quality of users. The effective transmission principle of channel is described from two dimensions of user downlink channel and communication vector function, and a hybrid beam forming model of millimeter wave MIMO is designed based on this. The design principle, implementation steps and algorithm complexity of MMW hybrid beam forming model are analyzed. Based on the model, the weighted vector of bi-directional alternately optimized transmitter and receiver arrays is determined, and the algorithm flow of digital simulation hybrid beam forming is given, and finally the balanced scheduling of multi-user MIMO is realized. Simulation results show that the proposed scheduling algorithm has the advantages of fast convergence, low computational complexity and high baseband transmission efficiency.

Key words: 5G communication, mixed beam, multi-user, massive multi-input and multi-output (MIMO), scheduling algorithm