

# 5G 通信中基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法研究

乡世辉

中软国际科技服务有限公司 广东 深圳 518100

**【摘要】** Massive MIMO 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两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流程，最终实现多用户 MIMO 的均衡调度。仿真结果表明，本文提出的调度算法具备收敛速度快、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；MIMO；调度算法；机器学习

## 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的速率、通信质量及移动网络性能上都有了质的飞跃<sup>[1]</sup>，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 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<sup>[2]</sup>。从传统 MIMO 技术的分类可知，MIMO 具体包括空间分集与波分复用<sup>[3]</sup>，信号的预编码及波束的赋型，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地稳定。Massive MIMO 技术是 5G 移动通信的核心与关键技术，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<sup>[4]</sup>。

## 1 5G 通信中 Massive MIMO 有利传输原理

假定 5G 通信中典型的 Massive MIMO 无线通信系统基站配备了  $m$  个通信天线单元，系统基站同时服务  $j$  个配备天线数量为  $n(n > 1)$  的网络用户，从理论上分析  $m$  的值远大于  $n$ ，并趋近于无穷大，在该种假设条件下第  $j$  个用户所接收到的通信信号  $S_j$  表示为：

$$S_j = \sqrt{SNR_{avg}} c_j s_0 + n_j \quad (1)$$

其中  $SNR_{avg}$  代表信号传输时的平均信噪比水平， $c_j$  代表第  $j$  个用户的下行信道<sup>[15-16]</sup>， $S_0$  和  $n_j$  分别表示基站发出的原始信号与系统传输环境中的高斯白噪声<sup>[17]</sup>。整合全部  $n$  个用户的接收信号为一个列向量，就可以得到网络用户端的整体信号：

$$S = \begin{bmatrix} s_1^T \\ s_2^T \\ \dots \\ s_k^T \end{bmatrix}^T = \sqrt{SNR_{avg}} c_{tal} S + n_{tal} \quad (2)$$

其中  $c_{tal}$  和  $n_{tal}$  分别为整体的通信下行信道和整体的系统环境噪声。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<sup>[5]</sup>。

## 2 毫米波 MIMO 混合波束成型设计

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<sup>[6]</sup>。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  $N_{RT} \times N_S$  的数字编码器  $F_{BB}$  处理，在经过维度为  $N_{RT} \times N$  的模拟编码器的  $F_{RF}$  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：

$$F_{RF} = \text{diag} \{ f_1, f_2, \dots, f_{N_{RF}} \} \quad (3)$$
$$= \begin{pmatrix} f_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & f_{N_{RF}} \end{pmatrix}$$

其中,  $f_i$  是第  $i$  个信号发射子阵列的控制矢量。

### 3 基于混合波束成型的多用户 MIMO 调度算法研究

对于毫米波 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, 提高系统整体的数据吞吐量。为此, 本文在比例公平算法方案的基础上, 提出混合波束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<sup>[7]</sup>。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调度次数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, 正交的两个波束  $p_i$  与  $p_j$  满足如下条件:

$$\left| \langle p_i, p_j \rangle \right| \leq \tau, \tau \in (0,1) \quad (4)$$

此时, 码本  $B_i$  由如下的公式 (15) 生成:

$$B_i = \begin{cases} \{p_i, \langle p_i, p_j \rangle \leq \tau\}, p_i, p_{i-1} \in B_{i-1}, i, j \geq 2 \\ B_0, i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

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<sup>[8]</sup>。

### 4 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<sup>[9]</sup>。不同射频链路下的方案实现频率效率对比, 如下图 1 所示:

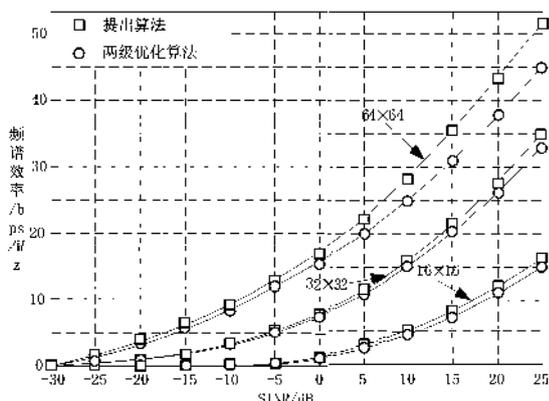


图 1 不同射频链路下方方案的频谱效率对比

如上图 1 中的频谱效率曲线变化所示, 当  $RF$  链路数为 2 时, 随着信噪比的增加两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率效率开始显现出来, 这表明随着天线阵列数量的增加, 提出方案具有更好的数据信号传输性能<sup>[10]</sup>。

### 5 结束语

5G 通信时代已经来临, 如何在高速无线网络条件下在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, 为此文章提出一种基于混合波束成型的通信调度算法研究, 仿真对比结果显示, 提出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] 黄宇红, 王晓云, 刘光毅. 5G 移动通信系统概述 [J]. 电子技术应用, 2017, 43(8):3-7.
- [2] 齐彦丽. 融合移动边缘计算的未来 5G 移动通信网络 [J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(3):478-486.
- [3] 蔡志强, 王平. 一种基于缺陷地结构的双单元 MIMO 天线阵宽带解耦方法 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2017, 29(2):176-181.
- [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] 王翔, 赵尚弘, 李勇军. 复用技术在空间光通信中的应用研究 [J]. 半导体光电, 2011, 32(3):392-397.
- [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. 有限字约束下的 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, 2017, PP(99):1-1.
- [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.