

5G毫米波系统波束拆分方案的仿真与性能评估

韩 晨, 王亚峰, 韦再雪, 杨鸿文

北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京

收稿日期: 2025年5月16日; 录用日期: 2025年6月9日; 发布日期: 2025年6月17日

摘 要

随着第五代(5th generation, 5G)移动通信技术的发展, 毫米波通信系统与多天线技术的应用与部署日益普及。多天线系统中天线阵列规模的持续扩大对波束赋形方案的灵活性与可实现性提出了更高要求。为在控制天线阵列复杂度的同时实现灵活调度, 本文研究了多峰拆分与收发通道(Transceiver, TRX)拆分方案, 二者均可在调度过程中生成动态数量波束, 提升系统性能。以单峰波束方案为对照, 本文通过系统级仿真对上述两种波束拆分方案进行了性能评估, 对比分析了引入强制丢包机制前后系统的性能变化。仿真结果表明, 引入强制丢包机制后两种波束拆分方案在吞吐率、传输时间间隔(transmission time interval, TTI)时延等多个关键指标均有大幅提升, 尤其在时延性能方面优势显著, 其中TRX拆分方案的整体性能优于多峰波束拆分方案。

关键词

5G毫米波, 波束拆分, 系统级仿真, 性能评估

Simulation and Performance Evaluation of Beam Splitting Schemes in 5G Millimeter-Wave Systems

Chen Han, Yafeng Wang, Zaixue Wei, Hongwen Yang

School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing

Received: May 16th, 2025; accepted: Jun. 9th, 2025; published: Jun. 17th, 2025

Abstract

With the development of the fifth-generation (5G) mobile communication technology, the application and deployment of millimeter-wave communication systems and multi-antenna technologies

文章引用: 韩晨, 王亚峰, 韦再雪, 杨鸿文. 5G 毫米波系统波束拆分方案的仿真与性能评估[J]. 无线通信, 2025, 15(3): 59-71. DOI: 10.12677/hjwc.2025.153007

have become increasingly widespread. The growing scale of antenna arrays in multi-antenna systems presents new challenges for the flexibility and feasibility of beamforming schemes. To achieve flexible scheduling while controlling the complexity of antenna arrays, multibeam and transceiver (TRX) beam splitting are investigated to support flexible scheduling under antenna complexity constraints. Both approaches enable the generation of a dynamic number of beams during the scheduling process, thereby enhancing system performance. The single beam scheme is used as a baseline to evaluate the performance of the two splitting schemes through system-level simulations, and changes in system performance are analyzed before and after the introduction of a forced packet dropping mechanism. The results show that, after incorporating the forced packet dropping mechanism, both beam splitting schemes achieve significant improvements in key metrics such as throughput and transmission time interval (TTI) latency, with especially pronounced gains in latency. Among the evaluated beam splitting schemes, the TRX splitting scheme delivers better overall performance than the multibeam approach.

Keywords

5G Millimeter Wave, Beam Splitting, System-Level Simulation, Performance Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着 5G 的发展,毫米波频段因拥有更加丰富的带宽资源,被认为是实现高速无线通信的重要手段。然而,毫米波信号存在传播损耗大、穿透能力弱等问题,传统的全向传输方式难以满足通信质量需求。因此,大规模多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术与波束赋形方法成为毫米波通信系统中的关键手段之一[1] [2]。

天线阵列规模的不断扩大,使系统在实际部署中不可避免地面临硬件成本、算法复杂度与资源调度灵活性之间的权衡问题。传统波束赋形中,全数字波束赋形虽然灵活度高,但每根天线都需配备一套射频(Radio Frequency, RF)链路,导致硬件成本与功耗极高;模拟波束赋形通过移相器对天线阵列进行统一控制,其结构简单、功耗低、实现成本较低,但灵活度也相对较低[3]。混合波束赋形兼顾全数字波束赋形的性能与模拟波束赋形的可实现性,已成为当前广泛研究的方向,应用于多用户通信、卫星通信与智能反射面等场景中[4]-[6]。本文即是在混合波束赋形基础上展开对波束方案的研究。

在波束管理的现有研究中,文献[7]介绍了波束管理的基本流程,并对近年来毫米波与太赫兹系统中的波束管理方案进行了整理。传统的多波束方案一般从子阵列划分和固定波束构造方面,提升阵列结构的灵活性、降低波束生成的复杂度。文献[8]利用不规则算法 X 与差分进化算法联合设计了基于模块化子阵列结构的不规则拼贴方案,在物理结构层面优化子阵列划分的空间几何与布置方式,提高阵列结构灵活性。文献[9]基于 Butler 矩阵设计了可支持多个固定波束方向的混合赋形阵列,为大规模 MIMO 系统提供了一种低复杂度的多波束实现路径。以上两种方案基于静态结构优化或预设固定波束集合,尚未考虑实际通信系统中波束生成需求随调度规则动态变化的情形,灵活性有限。文献[10]提出的波束拆分 NOMA 方案能在不引入额外 RF 链的前提下,在调度过程中生成波束动态指向 1 至 2 个方向。

本文工作综合了文献中的思想并进行了拓展延伸。首先通过固定波束扫描生成覆盖范围内的固定波束集合,随后对固定波束进行组合使用,可以理解为对波束方向的拆分处理,从而支持在调度过程中动

态生成数量可变的多波束结构，因此称为“波束拆分方案”。本文基于毫米波系统级仿真平台上对上述两种波束拆分方案进行了仿真，并与传统的单峰波束方案进行对比，对方案的系统性能进行了评估和分析。仿真分别在不强制丢包策略和强制丢包策略下进行，结果表明，在强制丢包策略下，波束拆分方案在实现性能均衡的同时，展现出显著的时延优势。

本文结构如下：第 2 节介绍 5G 毫米波系统的配置情况和波束拆分方案，第 3 节给出仿真结果并对方案性能进行评估，第 4 节总结全文。

2. 系统建模与波束拆分方案

2.1. 系统建模

本研究主要面向农村地区的典型部署场景开展仿真建模与评估。鉴于所研究场景具有基站间距大、用户密度低、环境开阔等特点，故采用 3GPP TR 38.901 定义的农村宏小区(Rural Macro, RMa)信道模型进行系统级构建[11]。相应的 5G 毫米波系统级仿真架构如图 1 所示，仿真参数设置见表 1。

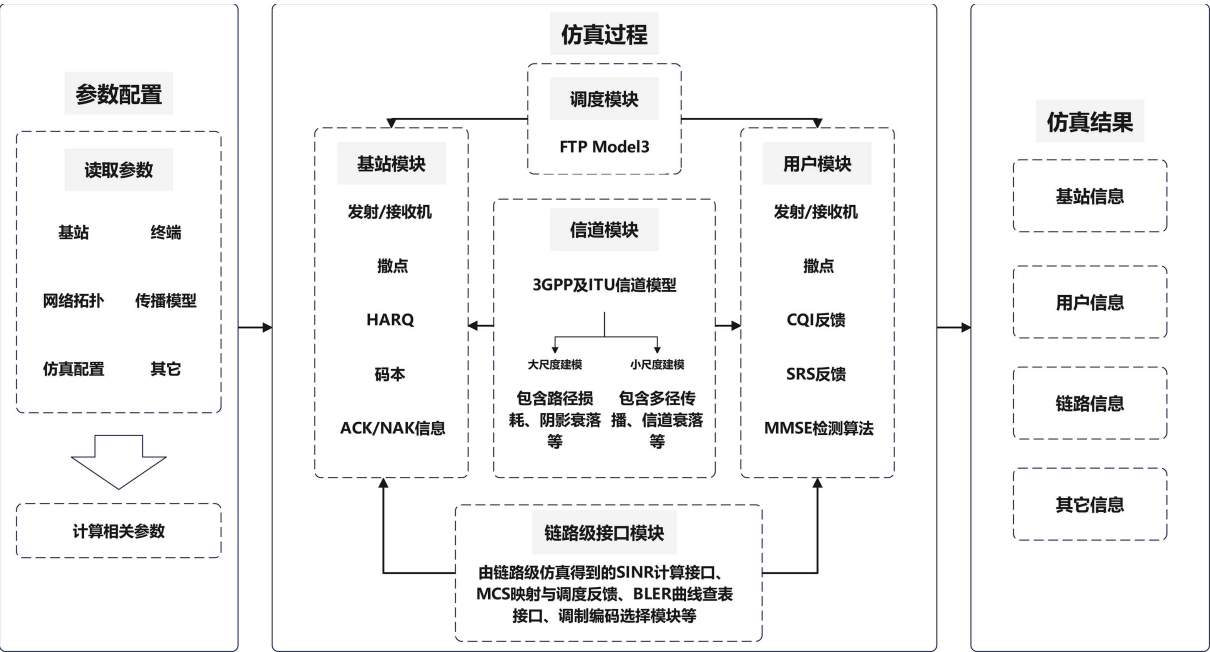


Figure 1. System-level simulation framework of 5G millimeter-wave systems

图 1. 5G 毫米波系统级仿真框图

Table 1. Basic parameter configuration for millimeter-wave system simulation

表 1. 毫米波系统仿真基本参数配置

配置参数	取值
载波频率	DL 28 GHz
带宽	800 MHz
双工模式	TDD
帧结构	DDDSU
子载波间隔	120 kHz

续表

部署方式	1 宏站 3 小区
覆盖范围	2000 m
信道模型	RMa LoS
业务模型	Full Buffer
BS 天线配置	66 dBm: 4Tx/4Rx (1, 2, 16, 16, 1:2, 1)
BS 天线高度	25 m
BS 接收机噪声系数	9 dB
UE 天线配置	2Tx/4Rx (1, 2, 4, 8, 1:2, 1)
UE 天线高度	1.5 m
UE 接收机噪声系数	9 dB
BS 接收机检测算法	MMSE-IRC
UE 接收机检测算法	MMSE-IRC
UE 分布	100%用户在室外
单小区用户数	20 个用户

2.2. 波束拆分方案

2.2.1. 数据准备

考虑 $M \times N$ 的天线阵列结构，其中 N 为偶数。图 2 是天线阵列示意图。以图中左上角天线振子为天线 $(0,0)$ ，则对于任意的天线 (m,n) ，在方向 (θ, φ) 与天线 $(0,0)$ 因行程差引起的电磁波相位差为

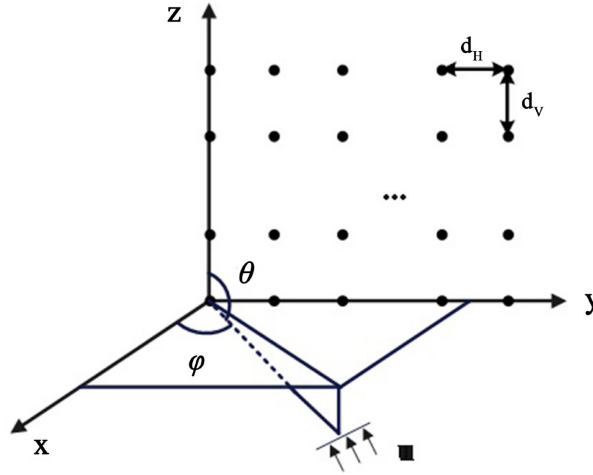


Figure 2. Schematic diagram of the antenna array

图 2. 天线阵列示意图

$$\Delta P_{m,n} = \exp \left(j2\pi \frac{1}{\lambda} (-md_V \cos \theta + nd_H \sin \theta \sin \varphi) \right) \quad (1)$$

因此通过对天线 (m,n) 赋予权值

$$W_{m,n} = \exp\left(j2\pi \frac{1}{\lambda} (md_v \cos \theta - nd_H \sin \theta \sin \varphi)\right) \quad (2)$$

即可补偿因光程差导致的相位差,使得天线阵列中所有天线在该方向电磁波的相位差为 0(即叠加幅值最大),进而形成该方向波束。

为确保波束覆盖的连续性与重叠度合理,固定波束的角度间隔依据其 3 dB 波束宽度进行设置,即可获得固定波束集合,记波束权值矩阵为 $f_k^{(1)}$,其中上标(1)表示该矩阵为单峰波束权值矩阵,下标 $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ 表示波束在固定波束集合中的编号, K 为集合中固定波束的总数。

后续采用的 TRX 拆分方案存在对天线阵列的拆分,即将整个天线阵列在水平维度上(沿 z 轴方向划分)均分为左右两个子阵列。考虑到天线阵子为双极化构造,每个子阵列对应两个极化通道,因此系统共包含 4 个独立通道。在随后的调度过程中,若依据 4 个通道的信道状态信息进行资源块分配,则相关资源数量记为 $4RNum$,若依据 2 个通道的信道状态信息进行资源块的分配,则将相关资源数量记为 $2RNum$ 。

在调度过程中,需首先确定优先级最高的 4 个波束,若所需的波束数量少于 4,则依据实际需要的波束数量进行选择。每个波束的优先级定义为其关联用户中优先级前 4 位用户的优先级之和,获取过程如表 2 所示。

Table 2. Procedure for acquiring the top 4 priority beams
表 2. 优先级最高的 4 个波束获取流程

输入: 所有波束的关联用户集合及其优先级
输出: $\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 优先级前 4 的波束编号

```

1  For each beam  $b$  in  $BeamSet$ 
2       $U \leftarrow$  Top 4 users associated with beam  $b$ 
3       $Priority_b \leftarrow$  Sum of priorities of users in  $U$ 
4  End For
5  Sort  $BeamSet$  by  $Priority_b$  in descending order
6   $\{b_1, b_2, b_3, b_4\} \leftarrow$  Top 4 beams in sorted  $BeamSet$ 
7  Return  $\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 

```

2.2.2. 多峰拆分方案

多峰波束拆分是一种通过调整波束赋形权值,在空间上生成多个方向波束的方案。对于多峰波束而言,使用最大权值归一化的方式对单峰波束的权值矩阵进行处理,即可以获得自身权值矩阵

$$f^{(n)} = \frac{\sum f_i^{(1)}}{\left\| \sum f_i^{(1)} \right\|^\infty} \quad (3)$$

其中, $f^{(n)}$ 表示 n 峰波束权值矩阵, $f_i^{(1)}$ 来自固定波束集合中第 i 个单峰波束权值矩阵,其中 $i \in \mathcal{B}$, $\mathcal{B}$ 为当前调度周期内选定的波束编号集合。

本方案始终依据 4 个通道的状态信息进行资源块分配,即依据优先级前四的波束所对应用户 $4RNum$ 占比情况,生成调度波束编号集合,具体方案见表 3。

Table 3. Steps for generating the scheduled beam index set
表 3. 生成调度波束编号集合流程

输入: $\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 优先级前 4 的波束编号
 $TotalRBNum$ 总可用资源块数
 输出: $\mathbb{F}$ 即将调度的波束编号集合

```

1   $Sum \leftarrow 0$ 
2   $\mathbb{F} \leftarrow \emptyset$ 
3  For  $n=1$  to 4
4      Compute  $4RBNum\_b_n$  //计算波束  $b_n$  的资源块需求
5       $Sum \leftarrow Sum + 4RBNum\_b_n$ 
6       $\mathbb{F} \leftarrow \mathbb{F} \cup \{b_n\}$ 
7      If  $Sum/TotalRBNum \geq 90\%$ 
8          Return  $\mathbb{F}$ 
9      End If
10 End For
11 Return  $\mathbb{F}$  //以上条件均不成立, 则默认调度全部 4 个波束
  
```

2.2.3. TRX 拆分方案

对于 TRX 方案, 包含依据 4 个或 2 个通道的状态信息进行资源块分配这两种情况, 即依据优先级前四的波束所对应用户 $4RBNum$ 、 $2RBNum$ 占比情况, 生成调度波束编号集合, 具体方案见表 4。

Table 4. Steps for generating the scheduled beam index set
表 4. 生成调度波束编号集合流程

输入: $\{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 优先级前 4 的波束编号
 $TotalRBNum$ 总可用资源块数
 输出: $\mathbb{F}$ 即将调度的波束编号集合

```

1  Compute  $4RBNum\_b_1$  //计算  $b_1$  的 4 通道资源块需求
2  If  $4RBNum\_b_1/TotalRBNum \geq 90\%$ 
3       $\mathbb{F} \leftarrow \{b_1\}$ 
4      Return  $\mathbb{F}$ 
5  End If
6  Compute  $2RBNum\_b_1$  //计算  $b_1$  的 2 通道资源块需求
7   $Sum \leftarrow 2RBNum\_b_1$ 
8   $\mathbb{F} \leftarrow \{b_1\}$ 
9  For  $n=2$  to 4
10     Compute  $2RBNum\_b_n$  //计算  $b_n$  的 2 通道资源块需求
11      $Sum \leftarrow Sum + 2RBNum\_b_n$ 
  
```

续表

12	$\mathbb{F} \leftarrow \mathbb{F} \cup \{b_n\}$
13	If $Sum/TotalRBNum \geq 90\%$
14	Return $\mathbb{F}$
15	End If
16	End For
18	Return $\mathbb{F}$ //以上条件均不成立, 则默认调度全部 4 个波束

对于生成的波束编号集合, 当集合内波束数量为 1 时, 则权值矩阵为 $f^{(1)}$; 当集合内波束数量为 2 时, 逻辑上将天线阵列垂直居中拆分, 权值矩阵可视为将单峰权值矩阵各取左半边后拼接, 假设生成波束的编号集合为 $\{i, j\}$, 则分配给左通道、右通道的波束编号分别为 $\{i\}$ 、 $\{j\}$, 取固定波束权值矩阵 $f_i^{(1)}, f_j^{(1)}$, 将矩阵居中拆开, 分别获得规模为 $M \times N/2$ 的左子阵, 记为 $f_{i_left}^{(1)}, f_{j_left}^{(1)}$, 最终可得权值矩阵 $f = [f_{i_left}^{(1)}, f_{j_left}^{(1)}]$; 当集合内波束数量为 3 时, 假设生成波束的编号集合为 $\{i, j, k\}$, 则分配给左、右通道的波束编号分别为 $\{i\}$ 、 $\{j, k\}$, 其中左通道权值矩阵为 $f_{i_left}^{(1)}$, 而分配给右通道的权值矩阵为使用式(3)对 $f_{j_left}^{(1)}, f_{k_left}^{(1)}$ 进行叠加后得到的 $f_{right}^{(2)}$, 则权值矩阵 $f = [f_{i_left}^{(1)}, f_{right}^{(2)}]$; 当集合内波束数量为 4 时, 假设生成波束的编号集合为 $\{i, j, k, l\}$, 则逻辑上分配给左、右通道的波束编号为 $\{i, j\}, \{k, l\}$, 同理可得权值矩阵 $f = [f_{left}^{(2)}, f_{right}^{(2)}]$ 。

3. 仿真结果与性能分析

3.1. 波束拆分效果

本小节以三波束方向为例, 给出波束生成效果, 波束指向角度为 $(0^\circ, 90^\circ)$, $(6^\circ, 78^\circ)$, $(-6^\circ, 78^\circ)$ 。

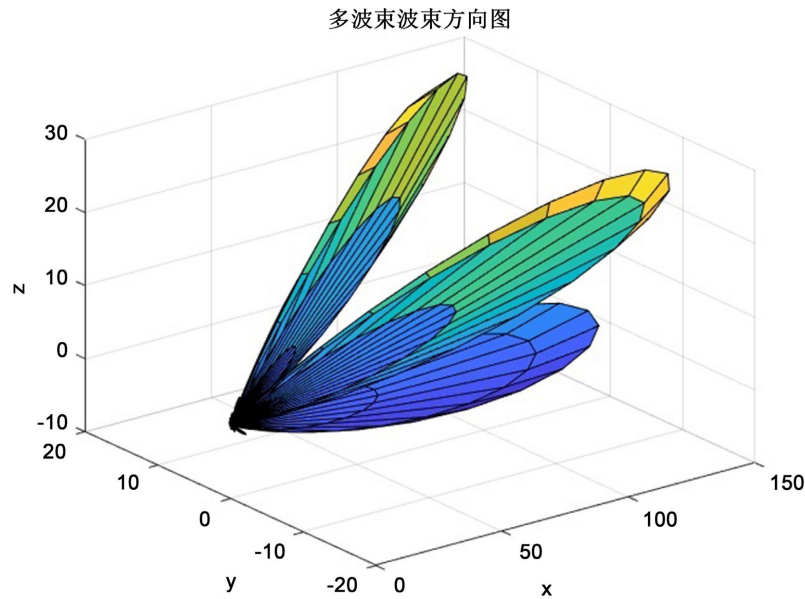


Figure 3. Beam pattern of the multibeam splitting scheme

图 3. 多峰拆分方案波束方向图

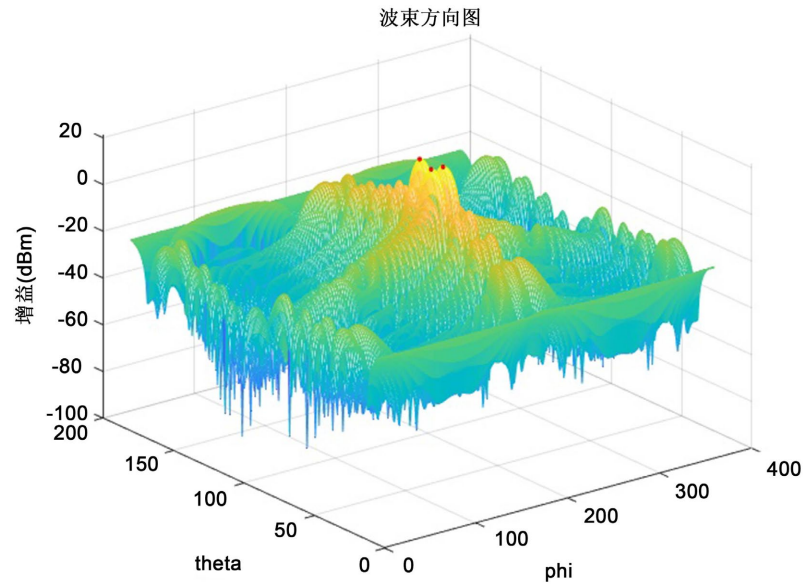


Figure 4. Beam gain pattern of the multibeam splitting scheme
图 4. 多峰拆分方案波束增益图

图 3 是多峰拆分方案的波束方向图，其处于三维空间坐标系中，波束表面到原点的距离为波束增益幅度，可以看出，波束增益在分布上相对比较均衡，能够在多个预设方向上同时形成相对一致的辐射强度。图 4 是多峰拆分波束方案的波束增益图，将波束按垂直、水平平移后角度展开，其中波束位置用红色标记，多峰拆分方案最高增益可达 21.63 dB。

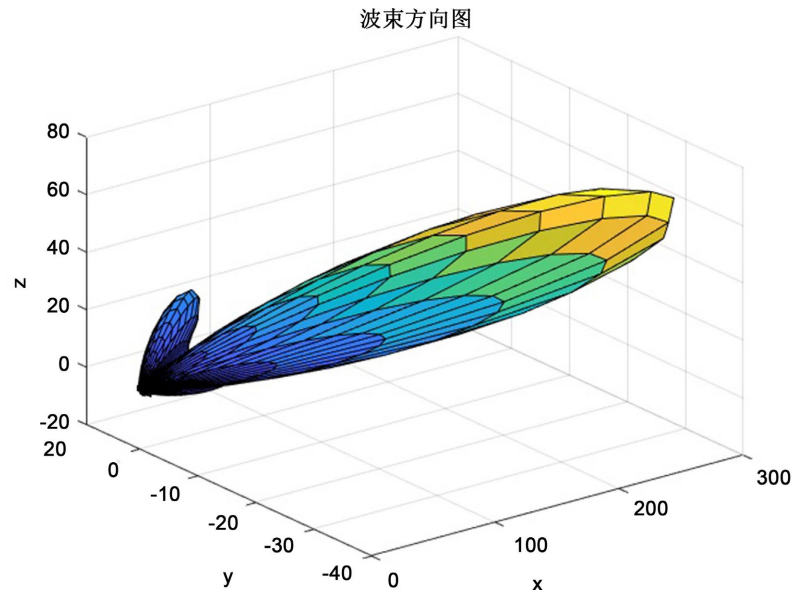


Figure 5. Beam pattern of the TRX splitting scheme
图 5. TRX 拆分方案波束增益图

图 5 是 TRX 拆分方案的波束方向图，同样处于三位空间坐标系中，存在一个波束朝向增益远大于另两个朝向增益。图 6 是 TRX 拆分波束方案的波束增益图，其中波束位置用红色标记，多峰拆分方案最高

增益可达 24.82 dB。最高增益比多峰拆分方案高 3 dB，即 TRX 拆分方案相较于多峰拆分方案具有更明显的方向特性。

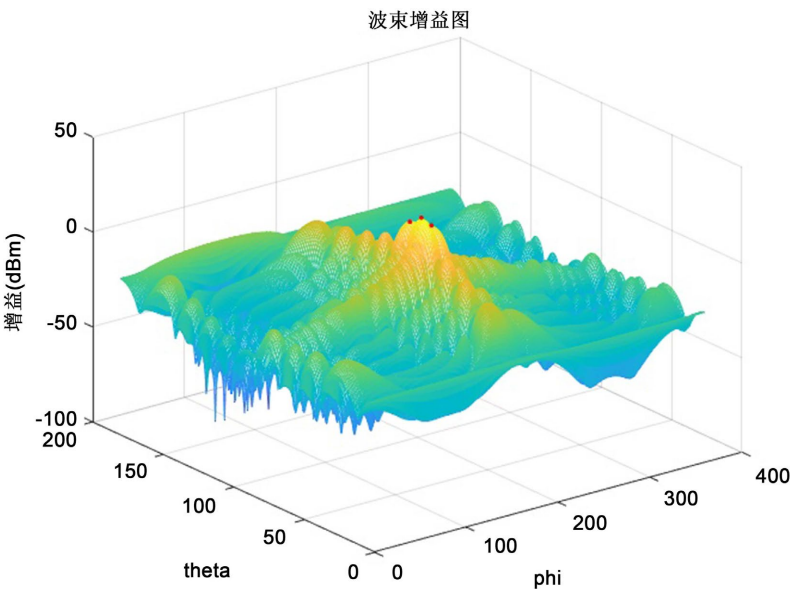


Figure 6. Beam gain pattern of the TRX splitting scheme
图 6. TRX 拆分方案波束方向图

3.2. 性能评估

为评估波束拆分方案的传输性能，本文采用 FTP Model3 业务模型进行系统级仿真，该业务模型为连续数据包传输类型，具有中等负载特性，符合典型的移动宽带应用场景。具体配置为：每个数据包大小为 8kbit，仿真周期为 2500 时隙，以模拟在中短时间尺度下用户的业务行为和网络负载响应。仿真中考虑了 HARQ 反馈与调度延迟等机制，设定了最大可接受传输时延阈值，即当某数据包在规定时间内未能成功送达，将视为丢包处理，其对应的传输延迟即定义为“强制丢包时延”。同时，为了使波束方案对比效果更加明显，仿真采用的是伪随机的方式进行撒点，即不同波束方案中小区内用户位置保持一致。本节主要对比了强制丢包时延设置为 1000 ms、8 ms 情况下网络性能。

Table 5. Performance comparison of SU-MIMO splitting schemes
表 5. SU-MIMO 拆分方案性能对比

性能指标	TRX 拆分	多峰拆分	单峰
SSB-RSRP (dBm)	-104.08	-104.07	-104.07
PDSCH SINR (dB)	26.04	26.79	28.60
小区平均吞吐率(Mbps)	326.07	300.37	398.22
边缘吞吐率(Mbps)	8.22	8.22	18.01
TTI 时延(ms)	15.23	20.65	4.67
PRB 利用率(%)	56.32	71.12	19.58

续表

对于 TTI 中调度波束指向方向个数 (0, 1, 2, 3, 4)的统计	0	1793	1673	4138
	1	1130	1346	3362
	2	1726	1620	0
	3	1765	1441	0
	4	1086	1420	0
用户数/TTI		2.82	3.43	0.87

当强制丢包时延设置为 1000 ms 时, 由于 2500 slot 对应仿真时长 312.5 ms, 则仿真可视为不模拟丢包过程。对仿真结果进行处理, 可得到表 5 中的数据。根据表 5 中的数据可以看出, 对于平均用户接收功率 SSB-RSRP 而言, 三种方案结果几乎一致。这一数据计算的是当所有天线都用于固定波束扫描时得到的最优波束匹配情况下单通道接受功率值, 基本一致则印证了三种方案用户位置相同, 避免一些不相干因素对研究产生的干扰。

信道信干噪比 PDSCH SINR 基本上反馈了用户调度过程中的信道质量。对比不同方案可见, 单峰方案在该指标上表现最优, 而多峰拆分与 TRX 拆分方案性能相近, 二者差距较小。这一结果可以说明, 在不进行波束拆分的情形下, 系统可以利用所有天线共同形成一个主波束, 从而获得更强的波束增益, 显著提升下行链路的信道质量。而在实施拆分策略后, 波束资源被划分到不同方向, 阵列增益降低, 信道质量降低。

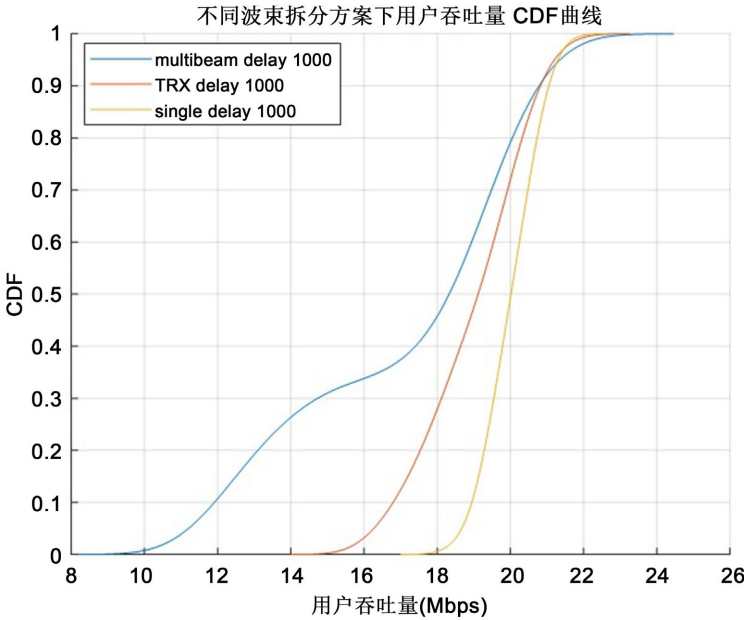


Figure 7. CDF comparison of user throughput under different SU-MIMO splitting schemes

图 7. SU-MIMO 不同拆分方案下用户吞吐量的 CDF 对比图

与 SINR 基本对应的是吞吐率, 单峰方案依旧展现出明显优势。如图 7 所示, 单峰方案整体上性能优于 TRX 拆分方案, TRX 拆分方案优于多峰拆分方案。在小区平均吞吐率指标下, 单峰方案达到 398.22

Mbps, 相对于 TRX 拆分与多峰拆分方案高出 20%以上。而在边缘吞吐率方面, 即读取 CDF 曲线 5%处用户吞吐率时, 单峰方案取值为 18.01 Mbps, 较 TRX 和多波束方案的 8.22 Mbps 提高了一倍以上。这一差异表明, 在不模拟丢包情况下, 波束增益与信道质量、吞吐率这两个性能指标密切相关, 波束集中波束增益强的情况下, 可实现更高的总传输效率; 而在覆盖弱、信道质量差的边缘区域, 单峰波束集中增强能力对于保障弱用户通信体验至关重要。

TTI 时延是对包生成至包传输成功消耗时间的均值, 仿真结果显示, 单峰方案以 4.67 ms 显著领先; TRX 拆分和多波束方案的时延均达到单峰方案的三倍以上, 受限于信道质量、多方向调度复杂度等因素, 表现相对较差。

对于 TTI 中调度波束方向个数的统计, 这一指标指的是仿真过程中, 累计生成过的指向 0、1、2、3、4 方向波束的数量, 由于仿真时长为 2500 slot, 且仿真按 1 宏站 3 小区模式进行部署, 因此每个时隙宏站生成的波束数量为 3 个, 即累计生成的波束数量为固定值 7500。从调度维度角度来看, 单峰方案在 TTI 中至多服务于单一方向, 其 0 方向调度达 4138, 占绝对多数, 空间复用能力极低。而拆分方案中, TRX 拆分与多峰拆分方案在方向维度上具有多样性。

在用户侧指标方面, 拆分方案的每 TTI 用户数可达单峰的三倍以上, 说明拆分策略显著提升了系统的多用户调度能力。资源块(Physical Resource Block, PRB)利用率这一指标统计的是调度资源块占总可调度资源块的百分比, 多峰拆分方案高达 71.12%, TRX 拆分方案为 56.32%, 而单峰方案仅为 19.58%, 这是因为单峰方案 SINR 更高, 信道质量更好, 即使调度少量资源块, 也能完成高效传输, 不需要分配太多 PRB。

Table 6. Performance comparison of SU-MIMO splitting schemes

表 6. SU-MIMO 拆分方案性能对比

性能指标		TRX 拆分	多峰拆分	单峰
SSB-RSRP (dBm)		-104.08	-104.07	-104.07
PDSCH SINR (dB)		25.71	24.77	28.58
小区平均吞吐率(Mbps)		395.89	390.68	399.61
边缘吞吐率(Mbps)		17.89	17.62	18.22
TTI 时延(ms)		2.05	2.83	3.37
PRB 利用率(%)		58.56	75.96	20.67
对于 TTI 中调度波束方向个数的统计	0	1690	1835	3401
	1	628	1182	4099
	2	1498	1825	0
	3	1884	1573	0
	4	1800	1085	0
用户数/TTI		3.73	3.17	0.95

当强制丢包时延设置为 8 ms 时, 仿真结果表 6 所示。依旧可以从 SSB-RSRP 指标印证用户位置一致, 排除一些不相干因素带来的差异。PDSCH SINR 指标方面, 基本保持稳定。

在吞吐率表现上, 三种方案在小区平均吞吐率上差异收敛, 单峰方案、TRX 拆分方案、多峰拆分方案分别为 398.22 Mbps、395.89 Mbps、390.68 Mbps, 都在 390 Mbps~400 Mbps 区间内, 彼此最大相差

超过 2%。由图 8 同样可以观察到这一点,在相较于不模拟丢包仿真中横轴吞吐率刻度缩小的情况下,三种方案的 CDF 曲线之间的距离相对更近一些;三种波束方案性能排序依旧是单峰方案、TRX 拆分方案、多峰拆分方案。同样的,边缘吞吐率也相对接近,彼此间最大相差不超过 1 Mbps,单峰略优于其他方案。

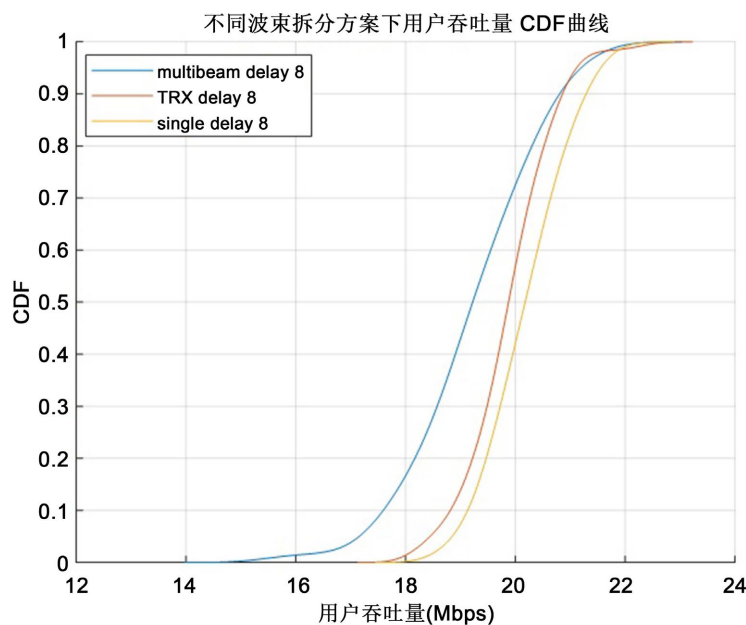


Figure 8. CDF comparison of user throughput under different SU-MIMO splitting schemes

图 8. SU-MIMO 不同拆分方案下用户吞吐量的 CDF 对比图

而对比仿真不丢包情况,TRX 拆分方案小区平均吞吐率增长 21%,边缘吞吐率增长 117.7%;多峰拆分方案小区平均吞吐率增长 30.1%,边缘吞吐率增长 114.4%。强制丢包机制的引入使得拆分方案系统性能有了极为卓越的提升。而单峰方案因本身吞吐率足够高,增长程度微乎其微。

TTI 时延方面,由于引入了强制丢包,变化非常明显。其中,变化程度最低的单峰方案 TTI 时延由 4.67 ms 降低至 3.37 ms,下降了 27.8%,而 TRX 拆分方案由 15.23 ms 下降至 2.05 ms,下降了 86.5%,多峰拆分方案由 20.65 ms 下降至 2.83 ms,下降了 86.2%,对于系统性能尤其是应用了波束拆分方案系统的性能有了极大的提升。同时,单峰方案的 TTI 时延比 TRX 拆分方案 TTI 时延高 64.4%,比多峰拆分方案高 19.1%。

PRB 利用率指标都有了一定的提升但变化幅度不大且相对关系并没有发生变化。而每 TTI 用户数方面可以看到 TRX 拆分方案由 2.82 升至 3.73,提升了 32.3%,而多峰拆分方案由 3.43 下降至 3.17,下降了 7.6%,单峰方案由 0.87 提升至 0.95,提升了 9.1%,改变幅度小但相对于原本就很小的基数而言,变化程度相对比较明显。

在每个 TTI 调度方向个数指标中,观察可得,TRX 拆分方案 1、2 方向波束调度情况明显降低而 4 方向波束调度情况明显升高;多波束方案中变化的没有 TRX 拆分方案明显但变化趋势整体与 TRX 拆分方案相反;单峰方案 1 方向波束调度明显增多,由 0 方向调度情况多余 1 方向调度情况变为 1 方向调度情况多余 0 方向调度情况。调度情况的改变直接影响到每用户 TTI 数量。

综上所述,在严格时延限制下,波束拆分方案性能都有了较为明显的提升,其中 TRX 拆分方案在各个指标间取得了良好的平衡,能够保持在有较高系统容量的情况下,TTI 时延性能提升明显,在对时延有

着较高场景中有着光明的应用前景。此外, 结合 TTI 调度方向个数的变化趋势与呈现的系统容量性能, TRX 拆分方案对有服务优先情况的场景优势明显, 而多波束调度或许更适合用户需求均衡的情况。

4. 结论

本文以单峰方案为基线, 通过系统级仿真研究了 5G 毫米波场景下多峰拆分方案和 TRX 拆分方案的性能。结果表明, 在不进行强制丢包情况下, 波束拆分方案相较于单峰方案性能优势并不明显; 而进行强制丢包情况下, 波束拆分方案性能逼近单峰方案的同时, 在 TTI 时延方面具有极大的优势, 对于一些时延要求比较高的场景具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] Tian, J., Han, Y., Jin, S., Zhang, J. and Wang, J. (2025) Analytical Channel Modeling: From MIMO to Extra Large-Scale MIMO. *Chinese Journal of Electronics*, **34**, 1-15. <https://doi.org/10.23919/cje.2023.00.418>
- [2] Ahmed, I., Khammari, H., Shahid, A., Musa, A., Kim, K.S., De Poorter, E., *et al.* (2018) A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **20**, 3060-3097. <https://doi.org/10.1109/comst.2018.2843719>
- [3] Kutty, S. and Sen, D. (2016) Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **18**, 949-973. <https://doi.org/10.1109/comst.2015.2504600>
- [4] Jain, S., Markan, A. and Markan, C. (2020) Performance Evaluation of a Millimeter Wave MIMO Hybrid Beamforming System. 2020 *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Santo Domingo, 18-20 November 2020, 1-5. <https://doi.org/10.1109/latincom50620.2020.9282332>
- [5] Wang, L. and Chen, Y. (2024) User Selection Algorithms and Hybrid Beamforming for Power Minimization in Multiuser Massive MIMO-OFDM LEO Satellite Communication Systems. 2024 *10th International Conference on Applied System Innovation (ICASI)*, Kyoto, 17-21 April 2024, 49-51. <https://doi.org/10.1109/icas60819.2024.10547955>
- [6] Guo, S., Hou, Y., Mao, J., Li, N., Chen, H. and Tao, X. (2022) Double RIS-Based Hybrid Beamforming Design for MU-MISO mmWave Communication Systems. 2022 *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Sanshui, 11-13 August 2022, 220-225. <https://doi.org/10.1109/iccc55456.2022.9880705>
- [7] Xue, Q., Ji, C., Ma, S., Guo, J., Xu, Y., Chen, Q., *et al.* (2024) A Survey of Beam Management for mmWave and THz Communications Towards 6G. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **26**, 1520-1559. <https://doi.org/10.1109/comst.2024.3361991>
- [8] Jiang, H., Gong, Y., Zhang, J. and Dun, S. (2023) Irregular Modular Subarrayed Phased Array Tiling by Algorithm X and Differential Evolution Algorithm. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **22**, 1532-1536. <https://doi.org/10.1109/lawp.2023.3250260>
- [9] Hu, Y. and Hong, W. (2018) A Novel Hybrid Analog-Digital Multibeam Antenna Array for Massive MIMO Applications. 2018 *IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Auckland, 5-8 August 2018, 42-45. <https://doi.org/10.1109/apcap.2018.8538310>
- [10] Zhou, Y. and Sun, S. (2022) Performance Analysis of Opportunistic Beam Splitting NOMA in Millimeter Wave Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **71**, 3030-3043. <https://doi.org/10.1109/tvt.2022.3144452>
- [11] 3GPP (2019) 3GPP TR 38.901 V16.1.0: Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16).