

5G 通信中的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法

唐婧¹, 彭春富², 赵武初²

(1. 常德职业技术学院 科技处, 湖南 常德 415000;

2. 常德职业技术学院 机电与信息工程系, 湖南 常德 415000)

摘要: 5G 通信系统中, 毫米波通信主机吞吐量不达标会影响通信设备在信道组织内对信息参量的分配能力, 从而使得毫米波主机在原通信节点处无法实现对预设信道组织的准确跟踪; 为解决 5G 通信中的多频段毫米波信道准确跟踪问题, 研究了 5G 专网的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法; 设计多频段通信谐振器, 通过设置合理的通信位置, 优化谐振器的布局, 并在毫米波滤波器中, 解析多频段通信谐振器中的毫米波通信数据, 通过赋予不同通信数据不同权重指标的方式, 进行多频段目标通信频段匹配; 由此, 通过信道矩阵和 IRS 反射元对基站的调整, 动态地改变信号的传播路径和特性, 优化毫米波信道目标吞吐量, 完成 5G 通信中的多频段毫米波信道跟踪; 实验结果表明, 应用上述方法跟踪毫米波信道组织的过程中, 通信主机吞吐量达标, 符合在信道组织内精准分配信息参量、实现信道准确跟踪的应用需求。

关键词: 5G 专网; 毫米波信道跟踪; 多频段通信谐振器; 毫米波滤波器; 信道矩阵; IRS 反射元

High Throughput Tracking Method for Multi Band Millimeter Wave Channels in 5G Communication

TANG Jing¹, PENG Chunfu², ZHAO Wuchu²

(1. Science and Technology Department, Changde Vocational College, Changde 415000, China;

2. Department of Electrical and Information Engineering, Changde Vocational College, Changde 415000, China)

Abstract: In 5G communication systems, if the throughput of millimeter wave communication hosts does not meet the standard, it will affect the communication equipment's ability to allocate information parameters within the channel organization, thereby making it impossible for millimeter wave hosts to accurately track the preset channel organization at the original communication node. To solve the accurate tracking for multi band millimeter wave channels in 5G communication, a high-throughput tracking method for multi band millimeter wave channels in 5G private network is studied. Design a multi band communication resonator, optimize the layout of the resonator by setting reasonable communication positions, and analyze the millimeter wave communication data in the multi band communication resonator in the millimeter wave filter. By assigning different weight indicators to different communication data, multiple target communication frequency bands can be matched; Thus, by adjusting the channel matrix and intelligent reflecting surface (IRS) reflection elements on the base station, the path and characteristics of the signal propagation are dynamically changed, optimizing the target throughput of the millimeter wave channel, and achieving multi band millimeter wave channel tracking in 5G communication. Experimental results show that the above method is applied to track the process of millimeter wave channel organization, the throughput of communication host meets the requirements of accurately allocating information parameters within the channel organization and achieving accurate channel tracking.

Keywords: 5G private network; millimeter wave channel tracking; multi band communication resonator; millimeter wave filter; channel matrix; IRS reflector element

收稿日期:2024-08-22; 修回日期:2024-09-27。

作者简介:唐婧(1980-),女,硕士,副教授。

引用格式:唐婧,彭春富,赵武初. 5G 通信中的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(2):137-142.

0 引言

5G 无线通信系统作为新一代移动通信技术,旨在提供比 4G 更高的数据传输速率、更低的延迟和更大的网络容量。为了实现这些目标,5G 系统采用毫米波频段进行通信。毫米波频段具有丰富的频谱资源,可以提供极高的数据传输速率^[1]。然而,毫米波信号在传播过程中容易受到大气衰减、障碍物阻挡和多径效应等因素的影响,导致信号衰减和路径损耗增加。为了保证通信系统必须能够实时跟踪和适应信道条件的变化,众多学者对此展开了研究。

米连锋等人^[2]提出了基于压缩感知的信道估计方法,在 DS-OMP 算法的基础上,定义更加合理的判决准则,以用来求解迭代阈值的稀疏度水平,由于通信过程中,毫米波主机始终保持完全开放的状态,所以通信数据的行、列稀疏度均为定值指标,主机元件只要依照稀疏度条件,就可以完成对信道组织内样点对象的实时跟踪。在该研究中,稀疏度是压缩感知中的关键参数,但实际应用中稀疏度往往难以精确估计。如果稀疏度估计过高,会增加算法的复杂度;如果估计过低,则可能无法准确重构信号,影响跟踪的准确性。崔伟等人^[3]提出了基于 IOC-CSMP 的信道跟踪方法,通过反选通信数据的方式,降低毫米波通信过程中的实际运算量,由于主机元件对数据样本的选取遵循回溯优化策略,所以通过判断相邻两个信道组织间信息计量差值的方式,就可以确定波段节点在信道组织中所处通信区域。虽然反选通信数据可以降低运算量,但如果运算量降低过多,可能会牺牲算法的精度和稳定性;如果降低不足,则无法充分发挥算法的优势,进而影响跟踪结果。李中捷等人^[4]通过定义波束跟踪与阻碍判断的联合预测为时间序列预测问题,设计基于 GRU-FIN 模型的预测方案,以提高移动通信场景下毫米波 MISO 系统在不依赖信道状态信息时的波束状态预测能力,从而提升传输稳定性。在该研究中,模型可能无法充分学习到数据的内在规律,导致预测精度不足或过拟合/欠拟合现象,影响研究结果的准确性。Andrianov 等人^[5]在相干接收毫米波信号时,通过最小化误码率准则分析由菲涅耳衍射控制的非正态振幅波动条件下,航天器—地面跟踪站传输线中数据传输的有效性,并探讨在对流层信道中实现高传输速率的最优信号传输频率。菲涅耳衍射的精确计算与建模可能复杂且耗时,特别是在复杂的大气条件下。这种衍射效应会导致信号强度的波动,影响信号的稳定性和可预测性。

在 5G 通信系统中,通过在多个频段上进行信道跟

踪,系统可以更灵活地选择最佳的通信频段,或者在不同频段之间动态切换,以保持通信链路的稳定性和性能。因此,提出 5G 通信中的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法,确保数据传输的高效性和可靠性,满足用户对高速、稳定通信的需求。

1 通信位置设置

通信数据在 5G 专网中保持谐波传输状态,且在传输频段来回切换时,通信数据的衰减速度较快,会导致部分信息参量无法传输至目标通信位置,这些变化会影响毫米波信号的传播特性^[6-8],导致信道状态不稳定,从而影响高吞吐量跟踪的准确性。谐振器具有频率选择性的特性,可以针对特定频段进行信号增强或抑制。在 5G 无线通信系统中,多频段通信谐振器可以针对毫米波频段优化天线和射频前端的性能,减少信号在传输过程中的衰减和失真,提高该频段内信号的传输效率和稳定性。通过加载谐振器,可以在特定频段内提高信号的传输效率和质量,从而提高整个通信系统的吞吐量^[9]。设计的 5G 专网多频段通信谐振器结构如图 1 所示。

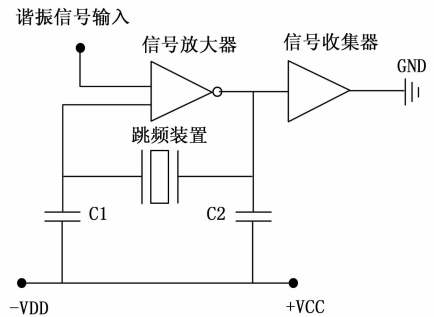


图 1 多频段通信谐振器设计结构

分析图 1 可知,多频段通信谐振器利用信号放大器来放大处理 5G 谐振输入信号,再经由收集器元件的聚合处理后,将毫米波信息传输至不同的 5G 专网基站中^[10]。利用多频段通信谐振器调整 5G 信号谐振频率,将通信数据与不同的信道频段匹配起来,从而实现 5G 专网多频段毫米波的全域通信。

然而,毫米波由谐振器位置传输至目标位置所需经历的信道距离越长,负载的毫米波波束数量越多^[11-13]。各个频段之间的带宽资源会变得紧张,使得系统无法及时处理所有接收到的数据。这会导致数据在传输过程中出现拥堵和延迟,无法满足高吞吐量跟踪的需求。通过合理的通信位置估算,可以优化谐振器的布局,减少信号在传输过程中的反射和散射,降低多径干扰。同时,还可以提高谐振器对特定频段信号的选择性和增强效

果, 从而增加系统的带宽利用率和吞吐量。

设 ΔB 为毫米波通信数据单位累积量^[14-16], b 为 5G 专网中毫米波波段的有效传输长度, ξ 为谐振器所输出毫米波通信信号的谐振强度, M 为 5G 信号谐振频率。利用上述物理量, 获得毫米波稳定通信节点:

$$\omega = \frac{M |\Delta B|}{\xi \cdot \sqrt{b}} \quad (1)$$

由此, 可设定多频段通信谐振器在 5G 专网中的通信位置, 表达式为:

$$Z = \frac{(\sigma + 1)M}{2} \left[\left(\frac{v_{\max}}{\omega} \right)^{-1/\tau} + \left(1 - \frac{\bar{v}}{\omega} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中, σ 表示毫米波信息在 5G 专网中的实时累积系数, v_{\max} 表示 5G 专网毫米波通信速率最大值, \bar{v} 表示包含多约束信息毫米波通信在 5G 专网中的传输速率均值, τ 表示通信位置估值参数。

由此, 连接谐振器与控制器之间的馈线和其他必要设备, 并根据测试结果对谐振器的位置、角度或参数进行优化调整, 以达到最佳的通信效果。

2 通信频段匹配

在多频段通信环境中, 由于每台基站主机所负荷的毫米波通信任务并不相同, 不同频段之间的信号可能会相互干扰, 导致通信质量下降。这种干扰可能表现为信号衰减、误码率增加或通信中断。所以利用毫米波滤波器对多频段通信谐振器中的毫米波通信数据进行独立解析。详细的解析过程如图 2 所示。

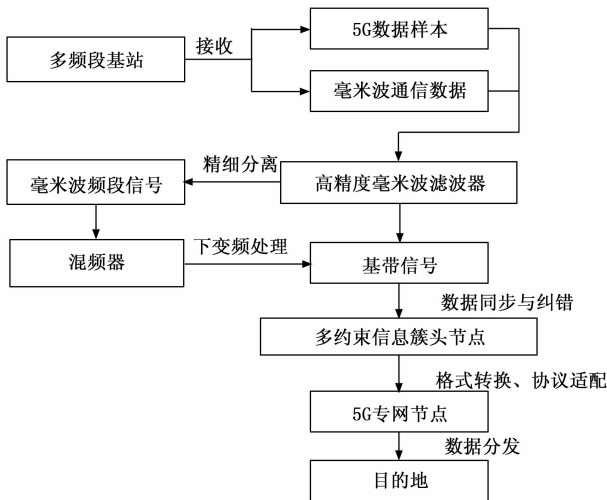


图 2 毫米波通信数据解析

如图 2 所示, 多频段基站通过其天线阵列接收来自不同频段的混合信号。这些信号中包含 5G 数据样本及毫米波通信数据, 它们可能因频段重叠而产生相互干扰。引入高精度毫米波滤波器对筛选出的毫米波信号进

行精细分离, 确保各频段信号之间的独立性。经过处理后的毫米波信号, 需进行下变频处理, 将其转换为基带信号, 利用信道编码进行错误检测和纠正, 提高通信的可靠性。将解析并纠正后的毫米波通信数据整合到多约束信息簇头节点中, 根据通信协议和路由策略, 利用 5G 专网节点中将数据分发至目的地。

毫米波通信数据 C 的解析结果如下:

$$C = \frac{V}{\tau^2} \times \sqrt{\left[\left(\frac{L_1}{v_1} \right)^2 + \left(\frac{L_2}{v_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{L_n}{v_n} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

式中, L_1, L_2, \dots, L_n 表示同一频段区域内 n 个不重合的毫米波通信数据, v_1, v_2, \dots, v_n 分别表示与 5G 专网节点匹配的毫米波通信参数, τ 表示多频段毫米波信道内的信息协调向量。

由于满足跟踪需求的通信数据必须得到 5G 专网多频段基站的同步认证, 所以必须保证毫米波信道组织处于连续开放状态^[17]。此时, 多频段目标通信场景就是帮助基站主机计量通信数据传输量值的必要条件。通过多频段目标通信场景的匹配, 基站可以更加精准地应对不同频段间的干扰问题, 提高毫米波信道的抗干扰能力和通信稳定性^[18]。这有助于保持毫米波信道的高吞吐量特性, 确保数据传输的连续性和可靠性。

设 \hat{x} 表示毫米波信道内的数据样本的通信赋值权重, ω 表示多频段网络中的通信数据记录项, z 表示通信数据融合阈值, \vec{Z} 表示 5G 专网内的毫米波通信数据融合向量, θ 表示毫米波信道内的通信数据加权运算系数。联立公式 (3), 可将通信数据加权融合处理结果表示为:

$$X = \frac{(\bar{\omega} - 1)\hat{x}}{C \sum_{z=1}^{+\infty} |\vec{\omega}|^{-1}} \quad (4)$$

由此, 基于不同频段间的干扰水平赋予不同通信数据不同权重指标, 在数值层面上求解加权平均值, 从而使 5G 专网主机在跟踪毫米波信道组织时, 能够有效地利用各个频段内通信数据的优点, 避免单一数据的不确定性造成的匹配偏差。由此, 多频段目标通信频段匹配结果 H_n 的表达式为:

$$H_n = o_n | J_n X | \quad (5)$$

式中, J_n 表示 n 个共存的 5G 通信频段 (n 表示 5G 专网所开放毫米波频段的数量), 且每一频段对于毫米波信号的传输、数据信息的负载能力完全相同, o_n 表示不同通信频段内的目标场景定义项, $n = (1, 2, 3, \dots, n)$ 。

通过频段匹配, 可以选择最适合当前通信需求的频段进行数据传输, 从而减少信号干扰和频段拥塞问题, 提高通信质量。

3 多频段毫米波信道高吞吐量跟踪

虽然多频段通信提供了更多的频谱资源，但在某些地区或时段，不同设备对频段的支持和处理能力存在差异，可能导致在某些频段上无法实现预期的通信效果。通过信道矩阵和 IRS（智能反射面）反射元动态地改变信号的传播路径和特性，以适应不同的通信场景和信道条件，从而提高信道的适应性和稳定性。

信道矩阵是多频段目标通信场景下^[19]，通过综合列向（影响纵深向传输能力）与行向（影响水平向传输能力，其值越大越倾向于水平向筛选）定义条件约束毫米波天线通信信道跟踪范围，以增强信道传输能力的信息样本集合。基站是信道矩阵调整的主要执行者。基站通过接收用户设备发送的信道状态信息，利用波束成形技术来调整信道矩阵中的参数。

规定 \hat{S} 表示毫米波通信数据在毫米波天线信道组织中的传输向量， ν 表示列向定义参数， ι 表示行向定义参数，二者取值同时属于 $[1, +\infty)$ 的数值区间， $\nu = 1, \iota = 1$ 同时成立时，表示当前频段的目标通信场景中只包含一项毫米波通信数据对象，可将信道内通信数据的信道矩阵定义式表示为：

$$\mathbb{S} = \left(\frac{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}{2} \right) \frac{1}{\hat{S}} \cdot \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1\nu} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2\nu} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{\iota 1} & A_{\iota 2} & \dots & A_{\iota\nu} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中， H_1 表示第 1 个共存的多频段目标通信频段匹配结果。

IRS 控制器负责接收来自基站或网络控制中心的指令，并根据这些指令调整 IRS 上每个反射元的相位（和幅度）^[20-21]。IRS 控制器通过有线或无线方式与基站进行通信，确保实时、准确地调整反射元的状态。因此，在信道矩阵 \mathbb{S} 中选择两个不相等的数据样本 a_1 与 a_2 ，即 $a_1, a_2 \in \mathbb{S}$ ，联立上述物理量，计算 IRS 反射元跟踪参数为：

$$I = (\lambda - 1) \cdot \frac{(a_1 \cdot a_2)}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} p_1 \times p_2} \quad (7)$$

其中： p_1 表示数据样本 a_1 在毫米波信道内所对应的频段向量， p_2 表示数据样本 a_2 在毫米波信道内所对应的频段向量， i 表示毫米波通信的 IRS 反射特征， λ 表示基于多约束信息融合的毫米波信道跟踪参数。

IRS 的每个反射元都可以独立地调整反射信号的相位。通过智能地调整这些相位，IRS 可以重构无线信号

的传播路径，实现信号的定向增强、干扰抑制等功能^[22]。为了优化 5G 专网中基站主机对多频段毫米波信道的跟踪效果，基于通信行为的 IRS 反射强度，确定毫米波信道在传输通信数据的过程中的开放状态，对毫米波信道跟踪目标进行高吞吐量优化，保证每一通信频段内只能有一个传输信道目标场景保持活跃状态，以便于 5G 专网基站能够实现对信道的准确跟踪。

基于基站主机多约束信息融合机制所提取的具体通信数据对象和定义的多频段目标通信场景，在通信数据的信道矩阵约束下，对于毫米波信道目标跟踪进行高吞吐量优化，最终的跟踪优化结果如下：

$$G = \lg_d[(\tilde{f}\tilde{j})^2 - I\mathbb{S}] \quad (8)$$

式中， \tilde{d} 表示毫米波通信数据在目标通信场景中的转存特征， \tilde{j} 表示 5G 专网基站对于当前目标通信场景的跟踪参量， f 表示对应目标场景之间的毫米波通信数据传输系数^[23]。

完成毫米波信道高吞吐量优化后，通信数据的实时传输速率能够得到大幅提升，数据对象经过 5G 专网基站的认证后，直接经由频段组织由天线传输至毫米波收发器，由此实现信道的高吞吐量跟踪，从而解决信息参数的误传与错传问题。

4 实验与分析

本次实验以毫米波通信主机的实时吞吐量作为研究对象，选择本文设计方法、基于压缩感知的信道估计方法、基于 IOC-CSMP 的信道跟踪方法共 3 组不同的技术手段进行实验。

5G 专网多频段毫米波通信的完成需要毫米波基站、5G 专网基站的共同配合。其中，毫米波基站放置在信号源旁侧，用于接收通信过程中的所有毫米波信号对象；5G 专网基站放置在一定距离之外（通常情况下，该距离不会超过毫米波信号在通信过程中的辐射传输能力），集合移动用户终端（UE），基站（BS）使用多频段毫米波技术，通过不同频段的信号传输与终端进行通信，BS 工作在 28 GHz 频段，天线阵列具有 128 个天线元件，UE 工作在相同的频段，天线阵列具有 64 个天线元件；考虑建筑物、树木等环境障碍物引起的路径损耗，可以设置为 30 dB，UE 以 10 km/h 的速度沿水平方向移动，接收机噪声功率为 -90 dBm。实时监测各个频段上的信号质量和路径损耗变化，可以动态调整天线配置，选择最佳的频段，并采取自适应控制策略以保持稳定的信号传输，用于对毫米波通信数据进行收发处理。信号源与供电装置相连，闭合开关后，供电装置向信号源提供电力传输信号，这些

信号借助通信环网优先进入 5G 专网基站, 当信号对象的谐波传输强度满足毫米波定义标准后, 5G 专网基站向外输出信号, 直至毫米波基站能够接收到所有信号参量后, 正式开始实验。

毫米波通信主机吞吐量不达标是导致通信设备无法在信道组织内妥善分配信息参量的主要原因, 而这将影响基站设备对毫米波信道组织的跟踪能力。实验过程中的参数设置如表 1 所示。

本次实验以毫米波通信主机的实时吞吐量作为研究对象, 在不同跟踪方法作用下, 记录吞吐量的实时数值水平, 并将所得数值与基站主机所设定的标准吞吐量条件进行对比, 以判断不同跟踪方法作用下是否会发生吞吐量不达标的问题。

表 1 实验参数设置

参数名称		参数值
多频段通信谐振器	频段 1/GHz	26
	频段 2/GHz	28
	频段 3/GHz	39
	谐振器 Q 值(频段 1/2/3)	100
毫米波滤波器	通带宽度(GHz, 频段 1/2/3)	1
	插入损耗(dB, 频段 1/2/3)	1
	回波损耗(dB, 频段 1/2/3)	16
IRS 反射元调整	IRS 尺寸	16×16
	反射元间距/mm	3.8
	相位调整范围/(°)	0~360, 步长 10
	动态调整频率/ms	100
目标吞吐量		90%

图 3 反映了毫米波通信主机所设定的标准吞吐量条件。

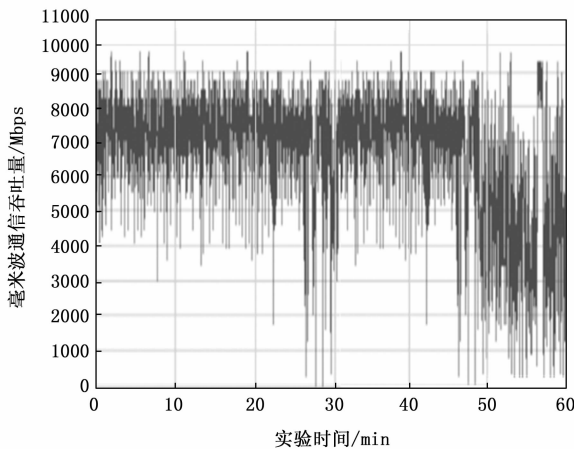


图 3 毫米波通信主机的标准吞吐量

分析图 3 可知, 毫米波通信主机所设定标准吞吐量的数值波动趋势极为明显, 30、50、60 min 左右时, 标准吞吐量的下限值极低, 基本接近于 0 Mbps; 0~40 min

的时间段内, 标准吞吐量的上限值分布相对较为平均, 基本维持在 9 000 Mbps 左右。

本次实验的具体执行流程如下:

首先, 应用本文设计方法进行 10 次实验, 记录该方法作用下, 10 次实验分别得到的毫米波通信主机的实时吞吐量, 并计算每种方法的平均吞吐量, 将所得结果为第一组变量。

然后, 应用基于压缩感知的信道估计方法进行 10 次实验, 记录该方法作用下, 10 次实验分别得到的毫米波通信主机的实时吞吐量, 并计算每种方法的平均吞吐量, 将所得结果为第二组变量。

接着, 应用基于 IOC-CSMP 的信道跟踪方法进行 10 次实验, 记录该方法作用下, 10 次实验分别得到的毫米波通信主机的实时吞吐量, 并计算每种方法的平均吞吐量, 将所得结果为第三组变量。

最后, 将第一组、第二组、第三组实验结果与图 3 所示的标准吞吐量数值进行对比, 并根据差值情况总结实验规律。

表 2 记录了第一组、第二组、第三组跟踪方法作用下, 毫米波通信主机实时吞吐量的数值变化情况。

表 2 毫米波通信主机实时吞吐量

实验时间 /min	第一组/Mbps		第二组/Mbps		第三组/Mbps	
	上限值	下限值	上限值	下限值	上限值	下限值
10	9 002	5 101	5 012	3 321	7 185	3 176
20	9 234	4 001	7 257	1 802	7 233	3 551
30	9 116	993	7 765	558	6 637	0
40	9 555	4 322	5 536	3 013	5 801	0
50	8 727	994	5 124	602	5 552	0
60	9 940	997	7 228	573	5 626	0

分析表 2 可知, 实验过程中, 第一组毫米波通信主机实时吞吐量的均值水平最高, 第三组毫米波通信主机实时吞吐量的均值水平最低, 第二组均值水平居于两者之间。且第一组毫米波通信主机实时吞吐量可以保持在 90% 以上。就上限值而言, 第 60 min 时, 第一组毫米波通信主机实时平均吞吐量取得最大值 9 940 Mbps, 超过当前时刻的标准吞吐量数值; 第 20 min 时, 第二组毫米波通信主机实时平均吞吐量取得最大值 7 257 Mbps, 小于当前时刻的标准吞吐量数值; 第 20 min 时, 第三组毫米波通信主机实时平均吞吐量取得最大值 7 233 Mbps, 也小于当前时刻的标准吞吐量数值。就下限值而言, 第 50 min 时, 第一组毫米波通信主机实时平均吞吐量取得最小值 994 Mbps, 超过当前时刻的标准吞吐量数值; 第 30 min 时, 第二组毫米波通信主机实时平均吞吐量取得最小值 558 Mbps, 小于

当前时刻的标准吞吐量数值。第 30~60 min 时, 第三组毫米波通信主机实时平均吞吐量均为零, 也小于当前时刻的标准吞吐量数值。

实验结论: 本文方法可以优化毫米波通信主机吞吐量, 可使实时吞吐量超过毫米波通信主机所定义的标准值。较高的吞吐量意味着能够在更短的时间内传输更多的数据, 从而更准确地反映信道状态的变化。这有助于信道跟踪算法更快地适应信道环境的变化, 提高跟踪的精准性。因此, 本文方法在精准跟踪毫米波信道方面具有突出作用价值。

5 结束语

在 5G 通信系统中, 实时获取信道状态信息, 有助于提升系统性能, 从而使得通信数据的传输策略得到优化, 为此设计了一种 5G 通信中的多频段毫米波信道高吞吐量跟踪方法。利用加载谐振器, 估算了多约束信息在 5G 专网中的通信位置, 有助于对毫米波通信环境的完善, 在高频段毫米波通信中的信道跟踪方面提供了新的思路与思想, 有助于基站主机对通信数据进行高效的融合与处理, 能够解决毫米波主机在原通信节点处无法实现对预设信道组织准确跟踪的问题。

参考文献:

[1] 朱熙铖, 张盼盼, 叶颖, 等. 一种基于折合式平面反射阵天线的毫米波高增益滤波天线 [J]. 固体电子学研究与进展, 2021, 41 (1): 41-46.

[2] 米连锋, 何雪云, 孙林慧. RIS 辅助无线系统中基于压缩感知的稀疏度自适应级联信道估计方法研究 [J]. 信号处理, 2022, 38 (10): 2173-2179.

[3] 崔伟, 于颖, 于海霞, 等. 基于 IOC-CSMP 的 OFDM 系统稀疏信道快速重构算法 [J]. 通信学报, 2023, 44 (2): 52-58.

[4] 李中捷, 熊吉源, 高伟, 等. 基于 GRU 网络的毫米波波束跟踪和阻碍判断联合预测方案 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2022, 34 (6): 958-966.

[5] ANDRIANOV M N, KOSTENKO V I. Communication efficiency of the millimeter wave channel in the spacecraft-ground tracking station transmission line [J]. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 2023, 50 (4): 128-132.

[6] 孟昭, 赵峰, 田昶瑶, 等. 基于双平行 MZM 调制器的矢量毫米波信号传输性能分析 [J]. 光电子·激光, 2022, 33 (11): 1183-1191.

[7] 聂益芳, 何希平, 唐亮贵, 等. 基于多波束训练的毫米波信道混合预编码方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47 (1): 13-18.

[8] 谢广成, 苏宇, 曾妍, 等. 一种基于优化的毫米波信道估计算法研究 [J]. 光通信研究, 2022 (3): 11-16.

[9] 陈雪盟, 梁仙灵, 张晓汉, 等. 基于 T 型谐振器的抗干扰矩形波导缝隙阵列天线设计 [J]. 电波科学学报, 2022, 37 (5): 743-750.

[10] 王艳妮, 孙学宏, 刘丽萍, 等. 一种毫米波 UWB 多模态 OAM 介质谐振器阵列天线 [J]. 无线电工程, 2023, 53 (2): 439-448.

[11] 王丹, 梁家敏, 梅志强, 等. 基于矢量近似消息传递的智能反射面辅助毫米波信道估计 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (7): 2400-2406.

[12] 王刚, 邓诗蕾, 陈顺利, 等. 一种低功耗架构下毫米波信道估计算法研究 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2023, 35 (2): 294-299.

[13] 蒲旭敏, 孙致南, 李静洁, 等. 可重构智能表面中低复杂度毫米波信道估计算法 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (7): 2281-2288.

[14] 张雨亭, 徐少毅. 面向 5G 毫米波通信中基于深度图搜索的波束干扰协调 [J]. 北京交通大学学报, 2023, 47 (2): 36-44.

[15] 刘紫燕, 马珊珊, 梁静, 等. 注意力机制 CNN 的毫米波大规模 MIMO 系统信道估计算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44 (1): 307-312.

[16] 李民政, 曹宇青, 颜娟娟, 等. 多智能反射面辅助毫米波级联信道估计方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46 (4): 15-20.

[17] 徐鹏政, 于启月, 林泓池, 等. 基于毫米波通信的新型机间数据链系统 [J]. 通信学报, 2023, 44 (4): 27-37.

[18] 安康. 5G 通信中数据传输的可靠性分析 [J]. 电视技术, 2022, 46 (2): 155-157.

[19] 廖勇, 杜洁汝, 杨馨怡. 基于 SLNR 与矢量扰动的毫米波大规模 MIMO 双层混合预编码算法 [J]. 电子学报, 2023, 51 (10): 2844-2854.

[20] 张祖凡, 段佳慧, 王国仲. 利用元学习算法的 IRS-OTFS 通信系统信道估计 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46 (4): 1353-1362.

[21] 张静, 王栋, 张梦雨. 改进的 IRS 辅助毫米波 MIMO 级联信道估计 [J]. 数据采集与处理, 2022, 37 (6): 1259-1267.

[22] 李焯, 郭婷婷. 混合 IRS 辅助大规模 MISO 中基于显性信道估计的联合波束成形设计 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40 (11): 3388-3393.

[23] 李泽丕, 李春树, 李佳宁, 等. 基于压缩感知的自适应再选择毫米波信道估计 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (8): 222-225.