

# 太赫兹频段 MIMO 通信系统的信道估计深度学习加速

任启超

西藏巨龙铜业有限公司 西藏拉萨

**【摘要】** 本文探讨了基于深度学习加速的太赫兹频段 MIMO 通信系统的信道估计技术。在高速数据传输和低延迟通信的需求下，太赫兹通信技术逐渐成为未来无线通信的关键。太赫兹频段的高频特性使得信道估计成为一项复杂且挑战性巨大的任务。为了应对这一挑战，本文提出了一种基于深度学习的信道估计方法，通过引入神经网络模型来提高估计精度，并加速传统估计算法的性能。实验结果表明，所提出的方法在信道估计精度和计算效率方面均优于传统技术，为太赫兹频段 MIMO 通信系统的实际应用提供了有力支持。

**【关键词】** 太赫兹频段；MIMO 通信；信道估计；深度学习；加速

**【收稿日期】** 2025 年 6 月 14 日

**【出刊日期】** 2025 年 7 月 15 日

**【DOI】** 10.12208/j.sdr.20250106

## Deep learning acceleration for channel estimation in terahertz band MIMO communication systems

*Qichao Ren*

*Xizang Julong Copper Co., Ltd. Lhasa, Xizang*

**【Abstract】** This paper explores deep learning-accelerated channel estimation techniques for terahertz band MIMO communication systems. Driven by the demands for high-speed data transmission and low-latency communication, terahertz communication technology has gradually emerged as a key enabler for future wireless communications. However, the high-frequency characteristics of the terahertz band make channel estimation a complex and highly challenging task. To address this challenge, this paper proposes a deep learning-based channel estimation method that incorporates neural network models to enhance estimation accuracy and accelerate the performance of traditional estimation algorithms. Experimental results demonstrate that the proposed method outperforms traditional techniques in both channel estimation accuracy and computational efficiency, providing strong support for the practical application of terahertz band MIMO communication systems.

**【Keywords】** Terahertz band; MIMO communication; Channel estimation; Deep learning; Acceleration

### 引言

太赫兹频段因其大带宽和高传输速率，成为未来无线通信系统的重要方向，特别是在 MIMO 通信系统中，能够显著提升频谱效率和数据传输速率。太赫兹信号在传播过程中容易受空气吸收和散射的影响，导致信道衰减和干扰，从而使信道估计成为关键问题。传统信道估计方法在处理太赫兹频段高频信号时面临精度低和计算复杂度高的挑战。随着深度学习技术的迅速发展，其在图像处理 and 语音识别等领域的成功应用为信道估计提供了新的思路。基于深度学习的信道估计方法能够通过自学习机制自动提取信道特征，从而提高估计精度，并加速传统方法的计算。本文探索深度学习在太赫兹频段

MIMO 通信系统中的应用，并评估其在提高信道估计效率和精度方面的优势。

### 1 太赫兹频段 MIMO 通信系统的信道估计挑战

太赫兹频段（0.1 THz - 10 THz）的通信技术为未来的无线通信带来了前所未有的潜力，特别是在大数据传输和高频宽需求的应用场景中，太赫兹通信具备非常明显的优势。太赫兹频段的使用也带来了显著的挑战，尤其是信道估计方面。与传统的无线通信系统相比，太赫兹频段的高频特性使得其信号在传播过程中极易受到空气吸收、散射、衰减以及大气干扰的影响。信道估计在太赫兹频段面临诸如多路径衰落、信号失真以及不稳定的信道状态等问题，这些因素都极大地影响了系统的可靠性和性

能。传统的信道估计方法多依赖于传统的统计信道模型，通常需要大量的训练数据和复杂的计算，且由于太赫兹信号的传播特性，这些方法在高频环境下的应用效果并不理想。

在 MIMO 系统中，信道的估计更是一个至关重要的问题。MIMO 技术通过多天线的空间复用方式有效提升频谱效率和通信速率，但信道估计的准确性直接影响到系统的性能。在太赫兹频段，由于信号的高频率带来的是极小的波长，这使得无线信号的传播更加复杂，尤其是在大规模 MIMO 系统中，多天线之间的信道交叉和非线性效应使得传统方法难以有效应对。由于传统方法多依赖于导频信号的反馈，且信道的稀疏特性和频谱的非线性干扰导致了导频信号的资源浪费。即使在理论上，频谱估计方法的性能仍然受到信号的动态变化和噪声的影响，常常无法满足高效且稳定的通信需求。

为了有效解决这些挑战，近年来，基于深度学习的信道估计技术作为一种新兴的解决方案逐渐得到了广泛的研究。深度学习技术通过神经网络模型能够自动学习信道的时空特性，显著减少对传统信道建模的依赖。相较于传统的信道估计方法，深度学习不仅能够处理高频信号的非线性特性，还能够通过数据驱动的方式自适应地优化估计结果。尤其是在复杂环境中，深度学习方法能够提取信道的深层特征，并且利用海量数据来改善估计精度。尽管太赫兹频段在传播过程中面临许多挑战，但基于深度学习的信道估计方法展现了强大的优势，成为克服这些挑战的一个有效途径。

## 2 深度学习在信道估计中的应用及优势

随着深度学习的不断发展，其在各种领域的应用都取得了显著成效，特别是在信号处理和无线通信领域，深度学习已成为一种重要的技术手段。在信道估计中，深度学习通过对海量数据的训练和分析，能够自主识别信道的时空特性，从而提升信道估计的准确性和效率。传统的信道估计方法往往依赖于信道的先验知识和复杂的数学模型，这在太赫兹频段 MIMO 通信系统中面临诸多挑战，如信道非线性、噪声干扰以及多路径衰落等问题。深度学习方法的引入，为这些问题提供了新的解决思路。

深度学习在信道估计中的主要优势体现在其强大的数据学习和自动化特征提取能力。深度神经网络 (DNN)、卷积神经网络 (CNN) 以及循环神经

网络 (RNN) 等多种网络结构可以根据不同的需求进行设计和训练，自动学习和提取信道的动态特征。通过大量历史数据的训练，深度学习模型能够准确模拟信道的变化趋势，并预测未来的信道状态。与传统的基于导频的估计方法相比，深度学习不仅能够实现更加精确的结果，还能显著减少对导频资源的依赖，提高频谱的利用效率。深度学习模型能够处理非线性和时变的信道环境，适应不同的传播条件和网络拓扑，展现了很强的鲁棒性。

在实践中，深度学习技术还能够通过优化计算过程来加速信道估计的速度。传统方法的信道估计往往依赖于迭代计算，计算复杂度高且实时性差。而深度学习模型经过训练后，能够快速地进行信道状态的预测和估计，极大地提高了系统的响应速度。这一优势在太赫兹频段 MIMO 通信系统中尤为重要，因为高频带宽和高速数据传输要求系统具备快速响应和实时处理能力。深度学习技术的引入，不仅提升了信道估计的准确度，也极大地改善了通信系统的性能，满足了现代无线通信系统对低延迟和高效率的需求。

## 3 基于深度学习的信道估计方法设计与实现

基于深度学习的信道估计方法设计，通常需要根据系统的具体需求进行定制，以便最优化地提升信道估计的精度和效率。设计过程中，首先需要明确网络结构的选择，常见的网络结构包括全连接神经网络 (DNN)、卷积神经网络 (CNN) 以及递归神经网络 (RNN)。每种网络结构有其独特的优势和适用场景。DNN 适用于处理高维的信道数据，CNN 能够很好地处理具有局部特征的信道信号，而 RNN 则适用于时序数据的处理，在信道估计中用于预测信道随时间变化的趋势。根据实际应用需求，往往会采用多层组合的网络结构，以便更好地提取信道的空间和时域特性。

在深度学习模型的实现过程中，数据预处理和特征选择也是至关重要的环节。由于太赫兹频段的信号传播受到多种因素的影响，信道数据往往包含大量噪声和冗余信息。数据的预处理不仅包括去噪，还需要通过特征选择来提高模型训练的效率。通过合理的数据集成、标准化和归一化处理，可以有效提升深度学习模型的性能。深度学习模型的训练过程也需要使用高效的优化算法，如梯度下降、Adam 优化器等，以提高训练速度并避免过拟合现象。

在实际应用中, 基于深度学习的信道估计方法已经在多种实验中得到了验证。通过使用卷积神经网络(CNN)对太赫兹频段的信道数据进行处理, 可以有效提取信号的时空特征, 并准确预测信道的变化趋势。实验表明, 与传统信道估计方法相比, 基于深度学习的模型不仅提高了信道估计的准确性, 还能够较短的时间内完成大规模数据的处理。这为太赫兹频段 MIMO 通信系统的高效运作提供了强大的支持, 同时也为未来的无线通信技术创新提供了新的思路。

#### 4 实验结果与性能评估

为了验证基于深度学习的信道估计方法在太赫兹频段 MIMO 通信系统中的实际有效性, 进行了多组实验研究。这些实验涵盖了不同的信道条件, 包括大尺度衰落、快速衰落、频率选择性衰落等, 以及不同的噪声环境, 如高斯白噪声、相位噪声和多径干扰等。通过这些多样化的实验设置, 能够全面评估深度学习方法在复杂环境下的鲁棒性和适应性。实验的主要目标是将基于深度学习的信道估计与传统的基于导频的信道估计方法进行对比, 重点考察两者在估计精度、计算时间以及对信道噪声干扰的抵抗能力上的差异。通过分析不同环境下的实验结果, 能够充分展示深度学习方法在提高信道估计精度和加速计算过程方面的优势, 同时也能评估其在复杂信道情况下的稳定性和高效性。

实验结果表明, 基于深度学习的信道估计方法相较于传统方法, 能够在多种不同的信道条件下取得更高的估计精度。在信道模型中, 传统方法通常依赖于先验知识和统计建模, 而深度学习方法能够根据训练数据自动学习信道特征, 避免了传统方法中对信道模型假设的依赖。这使得深度学习方法在复杂信道环境下仍然能够保持较高的估计精度。尤其是在太赫兹频段高频信号的传播过程中, 深度学习模型展现出更强的适应性, 能够有效应对信号的非线性衰减和多路径效应。实验还对比了基于深度学习的信道估计方法在计算效率方面的表现。由于深度学习模型经过充分的训练, 其在实际应用中的估计速度远快于传统方法的迭代计算过程。特别是在大规模 MIMO 系统中, 深度学习方法能够显著减少计算资源的消耗, 并提高系统的实时响应能力。这使得基于深度学习的信道估计方法在实际应用中具有较强的优势, 能够满足未来通信系统对高效率 and 低延迟的

需求。实验验证了基于深度学习的信道估计方法在太赫兹频段 MIMO 通信系统中的优越性能, 为该领域的进一步研究和实际应用奠定了坚实基础。

#### 5 结语

通过对基于深度学习的信道估计方法进行深入研究及实验验证, 结果表明, 深度学习技术在太赫兹频段 MIMO 通信系统中的应用显著提升了信道估计的精度和计算效率。相比传统的基于导频的信道估计方法, 深度学习不仅能够应对复杂信道环境中的衰落和噪声干扰, 还能够有效地减少计算复杂度和资源消耗。实验结果充分证明了深度学习方法在太赫兹频段 MIMO 通信系统中的强大适应性和优势, 为未来通信技术的发展提供了重要参考。随着技术的不断进步, 基于深度学习的信道估计方法将在高频无线通信中发挥越来越重要的作用, 推动未来通信系统向更高效、精确和智能化的方向发展。

#### 参考文献

- [1] 刘子乐. 太赫兹感知协同移动通信系统容量分析与优化[D]. 北京邮电大学, 2025.
- [2] 何永超, 张泰豪, 潘存华, 等. 室内 260~400GHz 太赫兹大规模 MIMO 近场通信信道测量、特性分析及建模[J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(06): 1281-1295.
- [3] 彭木根, 杨闯, 张红杰, 等. 感知协同移动太赫兹通信: 理论与应用[J]. 控制与决策, 2025, 40(03): 705-720.
- [4] 刘中艳. 太赫兹超大规模 MIMO-ISAC 系统中基于深度展开网络的波束成形研究[D]. 内蒙古大学, 2024.
- [5] 弋浩凡. 基于信道测量和射线追踪的太赫兹信道特性研究[D]. 北京交通大学, 2024.
- [6] 孙钰珂. Massive MIMO 系统低复杂度混合预编码方法研究[D]. 中原工学院, 2024.
- [7] 龚晔. 面向太赫兹非正交多址接入系统的资源分配研究[D]. 北京邮电大学, 2024.
- [8] 袁志强. 面向 6G 的超大规模天线近场非平稳信道参数估计和建模方法研究[D]. 北京邮电大学, 2024.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS