

毫米波通信雨衰补偿技术应用研究

师 涛

中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北石家庄 050000

摘要: 目前毫米波通信在很多通信领域有着广泛的研究空间, 尤其在大容量的数据通信和复杂场景的密集覆盖等方面。但与此同时, 毫米波的传播特性也导致其容易受到雨衰等各种恶劣环境因素的影响, 导致毫米波的传输信号损失严重, 如何规避雨衰带来的影响成为一个非常值得研究的问题。本文对毫米波通信在传输过程中的雨衰现象、雨衰原因、现有补偿技术的研究现状等问题进行分析, 并提出一些新的技术方法来减小雨衰的影响, 例如天线优化设计技术、信道信号优化技术以及基于大数据的信号雨衰智能补偿技术等。通过对不同补偿方法的实施条件、实现复杂度等方面的分析比较, 为进一步实现毫米波通信的良好实施和应用提供一些新的思路和方案。

关键词: 毫米波通信; 雨衰; 信号衰减; 天线设计; 补偿技术

引言

由于信息社会对大数据传输速率与空间信号连续覆盖需求的提升, 作为能够显著改善这一问题的通信方式之一, 毫米波通信已受到了越来越多的关注, 但是由于毫米波本身的高频率特点, 使它在遇到降雨、潮湿等天气时将会遇到严重的衰减, 特别是在雨量较大的气候中, 将会使得其通信作用大为受限, 数据传输稳定性与有效性均会受到影响。降雨衰减问题不仅会影响毫米波通信系统的质量, 还将大大增加系统的复杂度。雨衰补偿的研究进展虽然取得了很大成就, 但仍面临一系列困难, 比如不同的降雨场景对应的调节补偿, 适应能力强的硬件和软件设计方案等, 而本文将进行相关的讨论, 从这些问题展开分析毫米波通信技术的突破思路与可行方案。

一、毫米波通信雨衰补偿技术概述

(一) 毫米波通信的基本原理

毫米波通信使用高频段电磁波(30GHz—300GHz)作为载波进行通信具有频带宽, 速率高的特点, 在现代通信应用方面是一个理想的选择。相对于传统低频通信, 毫米波频谱资源丰富能够提供更高的吞吐数据, 但毫米波在通信传播中对周围环境影响较为敏感, 尤其是对降水、湿度等气象因素的影响, 这不利于毫米波在实际工程中的应用。但是, 毫米波通信将是5G和未来通信不可或缺的一部分。

(二) 雨衰现象的影响分析

雨衰是指下雨、冰雹、雪等气象因素对电磁波的传

播造成吸收和散射产生的衰减, 雨衰在毫米波通信中表现更为明显。由于毫米波波长相对短, 对降水比较敏感, 降雨水滴会折损信号, 特别是在暴雨等极端天气下衰减会非常明显。随着通信频率增大, 对降水造成的雨衰作用也加大, 特别是频段在100GHz以上时, 对降水影响会加大, 对通信可靠性带来影响, 甚至造成通信中断, 影响用户的体验效果。

二、毫米波通信中雨衰问题的成因挑战

(一) 雨衰对信号传播的影响因素

毫米波通信系统雨衰是一个受降水强弱、雨滴大小、雨滴形状以及通信频率等变量因素影响的复杂的多因素问题。降水强度直接影响毫米波雨衰的大小, 降水量越高, 雨衰越严重。降水天气条件下, 降水的分布、形状等对毫米波散射现象的影响显著; 毫米波通信系统的通信频率越高, 雨衰越大, 毫米波波长越短, 越容易被雨滴吸收或散射。由此, 降水天气情况是毫米波通信系统中不可避免的重要因素, 其造成的通信效果会影响毫米波的可靠性, 在雷电、暴雨等极端降雨条件下会造成更严重、更剧烈的通信质量下降, 直接导致应用环境的不安全性。

(二) 环境条件与设备限制导致的技术难题

气象因素并非毫米波通信中一切环境因素的概括, 由于地球上的气象条件会随着区域的改变而变化, 各地的气候、地貌特征和建筑物布局都可能造成毫米波在通信中的路径损耗变化, 比如说在山地或是森林都市地区, 复杂的地形及建筑物阻挡了毫米波的传输, 进一步恶化

了雨衰。因此，由于毫米波通信设备的制约，使得问题变得相当复杂^[1]。因为毫米波频段的特点，当前的设备存在一个共通的特征，即传输距离短、抗电磁干扰效果弱，这种特征在复杂多路径现象下的环境，比如在大尺度路径衰落的环境，在大尺度路径衰落的情况下，毫米波设备无法补偿信号衰耗，造成通信中断或者是极大的失真。因此，在复杂环境、恶劣气象环境的条件下，毫米波通信系统如何设计，成为了毫米波通信需要攻克的难关。

（三）雨衰补偿技术面临的主要瓶颈

虽然已有雨衰补偿方法，但目前仍存在很多制约补偿的实际问题。目前提出的雨衰补偿方法大多只是采取1种方法，并未融合多种方案形成综合补偿。例如有些方案依赖增大输出功率，但考虑电池寿命、设备散热等因素的限制，其功率补偿改善幅度有限；未能实现实时监测和迅速调整补偿策略，很多补偿方案对天气变化不能及时进行适应性调整，雨衰补偿不能够得到及时有效地改善；诸多补偿方案没有在大容量、高密度的系统中得到有效验证，无法满足各种规模、密度下的使用需求。这2点补偿的瓶颈需要在补偿方案、硬件结构、系统调整方面进行更深层次的研究。

三、雨衰补偿技术的研究方向与应用对策

（一）改进天线设计以减轻雨衰影响

其次就是天线的设计优化。由于毫米波的传播特性，天线在降水状态下有着关键作用。降水会吸收、散射信号以及导致多径影响等现象，使通信系统的质量下降。所以为了降低雨衰影响，应从更高的方向性及更强的抗干扰性方面进行天线的设计。因此出现了这样的设计方案，例如具有更高增益特性的定向天线，使天线以更集中地方式传播信号，进一步降低信号的传播路径损失。该设计进一步降低了雨衰影响的作用，能降低天线上信号的穿透损失，提高通信系统的信号接收强度，而天线材料的优化同样重要，尤其是在高频段的毫米波通信系统中，材料的种类会进一步减小衰减，增大穿透能力等^[2]。对天线进行适应性以及灵活性的设计是考虑因素，在天气变化影响天线的情况中，动态地调节天线的方向及增益等天线参数，这是目前加强雨衰影响的关键方式。所以天线的设计优化是关键的提高毫米波通信系统应对雨衰的重要方法。

（二）信号处理技术在雨衰补偿中的应用

其实信号处理技术对于雨衰补偿的理解绝对不是仅

仅停留在进行信号补偿的地步。因为毫米波对气象的敏感性较强，故而雨衰对于信号的影响呈现出一种明显的非线性特征，信号的处理也很难满足复杂环境中对于补偿行为的不同需求。正因如此，在现代信号处理技术中，很多毫米波通信系统尝试着运用算法与实时数据对雨衰影响做出调整。再通过信号的多次补偿来确保信号的误码率与衰减值的优化，如动态均衡、自适应滤波等都是较为常见的补偿手段。通过对环境状态的监测以及对传输行为的有效评估，信号的处理行为可以及时地改变，从而保障数据传输的稳定。其中以深度学习为基础的信号处理技术，如对历史上降雨频率的相关数据的处理，对其输出结果的监测以及实时对信号处理结果进行优化的方法，实现对雨衰的影响，抑制程度等。另外，同时与多通道传输技术相结合，则让这种补偿的能力大大增强^[3]。同时，利用多个通道的传输行为，确保其在面对衰减行为时，通过对多个通道数据的读取以及提取，减少衰减行为对传输的影响所造成的数据丢失等问题。

（三）使用多频段和波束成形提高系统稳定性

对于单一频段下的毫米波通信存在频繁中断以及传输性能差的问题，多频段技术的应用使得毫米波通信实现了在各个频段中选出最优的信号传输频点，解决单一频段下信号频点雨衰的现象。比如说低频频段在出现较大雨量时会实现信号的较好的传输，高频频段有着更大的信息传输能力但是在雨量过大的情形下信号传输较差，可以结合两个频段进行传输的方式来尽量减少信号频段的雨衰等现象。在多频段的应用上波束成形技术的应用实现了对于毫米波通信稳定性的进一步提高，波束成形技术实现了对于信号波形的动态调整，使得毫米波通信系统的信号传输形成了指定波束形式，降低了雨衰对于信号通信的影响，这使得通信的范围增加的同时也提高了频段的传输率^[4]。在动态气象条件下，针对波束成形技术调整，在多频段技术下的毫米波通信系统结合多频段与波束成形技术可以实现良好调整，使得大范围内的雨衰影响降低。

（四）结合大数据与实时天气预报优化补偿策略

单靠放大器对功率的放大或者对系统的加强都达不到目的，实现传统系统的巨大突破在于在采集信息和信息处理上的变化。应用大数据和天气预报实现准确、实时的雨衰信息采集和对天气预报的大数据分析，气象信息的来源是实时的，采集的数据包括降水强度、雨滴、气温变化，并且与历史天气情况进行对比，毫米波通信

系统可以更准确地获知准确的雨衰数据。既不是单纯的某项天气数据，而是包括各项天气数据分析可以得到综合的雨衰模型，在分析中可以得到根据实时信息给出的准确和实时的信息；因此，在天气预报中采用高频度信息采集的天气信息，通过对信息的流进行分析和对未来的天气变化进行预测和对将要发生的气象分析从而给系统进行提前预警。预警信息则可以系统会将参数提早优化，例如采用低频传输或者对补偿信号功率加强等措施提前进行处理。依据变化的环境条件可以采取对应的优化变化信息，因此该方案由于拥有不断优化和实时变化的处理特性，可以为用户提供稳定的服务，更为重要的是不会占用额外的网络资源。未来，随着信息的变化和变化的日趋丰富与复杂，未来对时间、数据的需要更加细致精准，信息的预知和处理可以通过云计算和信息统计等机器学习使得对信息数据的动态性，因此，整个优化情况看，毫米波系统中的信息处理和补偿更加依赖于这种智能的、大数据背景下的工作模式，为用户提供更加全面的信息^[5]。

(五) 基于物理模型的雨衰动态补偿方法

因此，基于物理模型的雨衰动态补偿技术是一种结合传统的理论方法与现代的技术手段，科学合理地对毫米波通信予以雨衰的补偿的技术，它是一种基于雨衰产生机制在物理层面上十分复杂的原因，构建了比较详细的物理模型进行探讨，是能够精确地模拟电磁波通过雨水传播特性过程，进而针对不同的天气状况对电磁波传输的强度进行量化的讨论过程，该物理模型是能够根据降水强度对电磁波传输强度的损失大小予以估算的过程，同时还能够结合相应的气象、地形等资料数据以及相应的通讯系统，动态补偿信号的衰减变化过程。同时，将原有的衰减动态补偿与实时变化的过程进行结合，能够在基于物理模型的降雨动态补偿技术中进行更为系统的补偿。具体而言，在该雨衰动态补偿方法中，该补偿具有非常高的动态性——不仅是能够补偿原有的衰减变化，更主要是对雨衰变化动态补偿和对变化的适时调整的技

术，能够基于不同雨滴群的分布、降水强弱、传输频率等因素，进行动态补偿信号的输出、频率选择调整甚至对雨衰的变大动态改变天线的发射方向以及相应的波束形态调整的变化过程^[6]。

结束语

作为未来的无线通信热门方向，毫米波通信的应用会遇到包括雨衰在内的很多问题，而本文的雨衰补偿技术相关研究给毫米波通信如何应对雨衰影响找到了一些方向，亦在天线、信号处理及补偿办法等方面探索到了一些解决方案。当前，在现有技术的手段下，雨衰影响基本能得到一定程度上的减轻，但面对更多、更复杂的使用环境，毫米波通信仍需相应的创新。而未来随着技术的逐步成熟，毫米波通信将在智能城市、互联网等领域得到更为广阔的应用空间，推动人类通信进入新纪元，提供更为高效、稳定的沟通方式，推动世界信息的飞速传输及相互交流。

参考文献

- [1] 黄子轩, 张靖, 何家皓, 赵靓, 雷碧婵. 毫米波通信下大气传播效应研究[J]. 2024 (13): 141-143.
- [2] 郑思明, 李鹏. 南京地区基于E频段毫米波链路的降雨监测研究[J]. 计算机与数字工程, 2023, 51 (11): 2746-2751.
- [3] 王卫民, 徐八林, 雷勇, 等. Ka波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象, 2024, 50 (3): 291-302.
- [4] 罗强辉, 段睿, 蓝廷帅, 等. 基于雨衰模型的Q/V频段信关站接收信号研究[J]. 雷达与对抗, 2025, 45 (1): 24-28.
- [5] 赵岐林. 无线通信基站雨衰检测及补偿方法研究[J]. 通信电源技术, 2023, 40 (5): 205-207.
- [6] 张常乐. 探析无线通信中针对雨衰的应对策略研究[J]. 现代传输, 2024 (3): 43-46.