

复杂环境下5G微波的抗干扰技术研究

陈锐谦, 王晋源, 李 阳

陆军工程大学训练基地, 江苏 徐州

收稿日期: 2026年5月17日; 录用日期: 2026年6月10日; 发布日期: 2026年6月16日

摘 要

随着无线电通信系统的高速发展, 其部署场景逐渐复杂多变, 5G微波通信作为传输与接收信号的核心技术, 面临多类型衰减与干扰因素等作用的严峻挑战。为提升复杂环境下5G微波通信的传输可靠性与全域覆盖能力, 本文系统梳理了5G微波通信的核心理论与典型应用场景, 明确了复杂通信环境的核心特征, 深入分析了复杂环境下5G微波通信面临的核心瓶颈问题, 针对性提出了覆盖传输优化、视距拓展、频谱管控、干扰抑制四大维度的系统性抗干扰改进措施。研究表明, 本文提出的优化方案可有效应对复杂环境下的多类型耦合干扰, 显著提升5G微波链路的稳定性与资源利用效率, 可为5G微波通信系统的工程部署与性能优化提供可行的实践参考。

关键词

5G微波通信, 复杂环境, 抗干扰, 信号衰减

Research on Anti-Interference Technologies for 5G Microwave in Complex Environments

Ruiqian Chen, Jinyuan Wang, Yang Li

Training Base, PLA Army Engineering University, Xuzhou Jiangsu

Received: May 17, 2026; accepted: June 10, 2026; published: June 16, 2026

Abstract

With the rapid development of radio communication systems, their deployment scenarios have become increasingly complex and variable. As a core technology for signal transmission and reception, 5G microwave communication is facing severe challenges from multiple types of attenuation and interference factors. To improve the transmission reliability and global coverage capability of 5G microwave communication in complex environments, this paper systematically summarizes the core theories and typical application scenarios of 5G microwave communication, clarifies the core

characteristics of complex communication environments, and deeply analyzes the key bottlenecks confronted by 5G microwave communication under such environments. Targeted systematic anti-interference improvement measures are proposed from four dimensions: transmission optimization, line-of-sight extension, spectrum management and control, and interference suppression. The research shows that the optimization scheme proposed in this paper can effectively cope with multi-type coupled interference in complex environments, significantly improve the stability and resource utilization efficiency of 5G microwave links, and provide feasible practical references for the engineering deployment and performance optimization of 5G microwave communication systems.

Keywords

5G Microwave Communication, Complex Environment, Anti-Interference, Signal Attenuation

Copyright © 2026 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

在现代无线通信高速发展背景下, 5G 微波通信凭借大带宽、低时延、部署灵活、无需依赖光纤铺设等技术优势, 已成为固定无线接入、基站无线回传、车联网通信等民用垂直领域的关键承载方式, 可满足海量高清数据传输、基站互联互通、移动业务实时交互等高频通信需求[1]。然而城市密集楼宇遮挡、复杂地形地貌、气象雨衰影响、电磁频谱拥挤等现实场景, 使得 5G 微波通信链路极易受信号衰减、非视距遮挡、同频邻道干扰等因素制约, 直接影响通信传输可靠性与业务服务质量。本文聚焦复杂城区非视距环境下基于智能反射面的 5G 微波回传链路干扰抑制为核心研究范畴, 通过分析城区信道传播特征与干扰形成机制, 以智能反射单元相位调控优化为切入点, 针对性提出链路优化与干扰抑制策略, 旨在提升城区非视距场景下 5G 微波回传链路的稳定性与传输性能, 为固定无线接入、车联网回传等民用场景通信体系建设提供技术支撑[2] [3]。

2. 5G 微波通信的核心理论与应用概述

2.1. 5G 微波通信的定义与技术特征

第一是大带宽高速率传输, 微波频段可提供数百兆赫兹甚至吉赫兹级的传输带宽, 能够完全匹配 5G 增强移动宽带场景的千兆级传输速率需求[4]。第二是低时延高可靠, 微波传输链路的传输时延可控制在毫秒级, 无需经过光纤传输的多级转发, 能够满足 5G 超高可靠低时延通信场景的性能要求。第三是部署灵活成本可控, 微波通信无需铺设光纤线路, 可快速完成站点部署与开通, 大幅降低 5G 网络的建设成本与运维难度, 尤其适配光纤资源难以覆盖的城郊、山区及老旧城区。第四是兼容先进多天线技术, 可无缝适配大规模多输入多输出等先进技术, 实现波束的精准指向与性能优化, 具备极强的民用场景适配能力[5] [6]。

2.2. 5G 微波通信的典型民用应用场景

第一是 5G 基站无线回传场景, 这是微波通信最核心的民用应用领域。针对 5G 宏基站与小基站的回传需求, 尤其是偏远区域、城市密集楼宇、老旧城区等光纤资源难以覆盖的场景, 微波回传可快速实现

基站与核心网的稳定连接,是5G网络全域广覆盖的关键支撑。第二是固定无线接入(FWA)场景,在城市核心区域与光纤铺设滞后的乡镇区域,微波通信可实现楼宇、园区间的高速数据互联,为家庭及政企用户提供专属高带宽无线接入服务,有效补充光纤接入的覆盖盲区,满足民用宽带与政企专线的定制化传输需求[7]。第三是应急民用通信场景,针对自然灾害、城市设施故障等突发场景,微波通信可快速搭建临时通信链路,保障民生通信与应急调度数据传输畅通,弥补固定通信设施损毁后的服务空白。第四是车联网(V2X)与工业互联网场景,在城市道路、港口、矿山、工业园区等区域,微波通信可实现路侧单元与车辆、工业设备间的高速无线互联,支撑自动驾驶数据回传、高清视频监控、远程工业运维等垂直业务,适配民用交通与工业场景的定制化通信需求[8]。

2.3. 复杂民用通信环境的界定与核心特征

第一是信道传输条件恶劣,环境中存在大气吸收、雨衰、植被与建筑遮挡等多种衰减因素,信道传输损耗呈现显著时变特性,无法维持固定稳定的链路预算,对通信链路的自适应调整能力提出极高要求。第二是视距传输条件难以保障,受城市高层建筑、植被山体、道路构筑物等障碍物影响,通信链路视距路径被频繁遮挡,非视距传输成为城区常态,多径效应引发的信号畸变问题十分突出[9]。第三是电磁环境复杂多样,城市空间内存在同频组网、邻系统共存、工业设备电磁辐射、海量民用无线终端干扰等多种干扰源,干扰信号的类型、强度与频谱分布呈动态变化,持续影响有用信号的接收质量。第四是多因素耦合性强,复杂城区环境中传输衰减、遮挡损耗、电磁干扰等因素同步存在、相互叠加形成复合影响,单一抗干扰技术难以实现全场景性能优化,需构建适配城区非视距场景的系统性干扰抑制体系。

3. 复杂环境下5G微波通信面临的瓶颈与干扰问题

3.1. 传播环境带来的信号衰减

3.1.1. 大气吸收与雨衰造成的链路损耗

微波信号在大气中传播时,会受到大气中氧气与水蒸气分子的共振吸收作用,出现不可逆的能量损耗。氧气分子在60GHz频段附近存在极强的吸收峰,水蒸气分子在22GHz频段附近存在明显的吸收峰,当微波载波频率处于这些吸收峰附近时,大气吸收损耗会出现显著提升。自由空间传播损耗是微波传输最基础的损耗来源,其计算公式为

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg d$$

公式中, L_{fs} 为自由空间传播损耗,单位为分贝, f 为载波频率,单位为兆赫兹, d 为收发两端的传输距离,单位为千米。从公式可以看出,自由空间传播损耗与载波频率和传输距离的对数成正比,载波频率越高,传输距离越远,自由空间传播损耗越大。

3.1.2. 障碍物遮挡引发的信号深度衰减

在城市复杂环境中,微波传输链路常受高层建筑、连片林木、桥梁构筑物、老旧小区楼栋等遮挡影响。障碍物遮挡会导致微波信号产生额外绕射损耗,当障碍物遮挡微波传输主菲涅尔区时,绕射损耗急剧上升,形成信号深度衰减。菲涅尔区是微波传播收发两端之间的椭球形空间区域,该区域内障碍物会对电磁波传播产生显著干扰。在城市密集城区,低层部署的5G微站、皮站微波回传链路,长期受高层建筑遮挡,信号深度衰减可达二十分贝以上,易造成接收端信号功率低于接收灵敏度,引发链路波动甚至短时中断。同时,钢筋混凝土建筑、茂密绿植对微波信号具备强吸收特性,进一步压缩微波链路覆盖范围,制约5G微波在城区FWA与V2X回传场景的应用稳定性。

3.2. 视距传输受限与信号穿透能力不足

3.2.1. 微波通信视距传输的硬性约束

微波通信尤其是载波频率超过 10 GHz 的高频段微波，电磁波的绕射能力极弱，主要依赖收发两端之间的无遮挡直线视距传输。视距传输的最大距离受到地球曲率与收发天线高度的双重约束，其极限传输距离的计算公式为

$$d = 4.12 \times (\sqrt{h_t} + \sqrt{h_r})$$

公式中， d 为视距极限传输距离，单位为千米， h_t 为发射天线的架设高度，单位为米， h_r 为接收天线的架设高度，单位为米。从公式可以看出，视距极限传输距离与收发天线高度的平方根之和成正比，天线架设高度越低视距极限传输距离越短。在常规的基站部署中，十米高度的天线，视距极限传输距离仅为十几千米，若传输距离超过该极限，地球曲率会直接遮挡传输链路，无法实现稳定的视距传输。在山区、峡谷等复杂地形中，即使传输距离在视距极限范围内，山体、地形起伏也会遮挡视距链路，导致视距传输无法实现。

3.2.2. 地形与建筑物遮挡的显著影响

城市密集城区高层建筑林立、楼间距狭小，低层微站与宏站之间难以寻找无遮挡视距传输路径，成为 5G 微波回传的核心痛点。城郊丘陵、山体起伏区域，长距离微波链路易受山体遮挡，进一步加剧视距传输难题。同时微波信号穿透能力随载波频率升高显著下降，Sub-6 GHz 频段微波穿透普通砖墙衰减仅为数分贝，而 28 GHz 毫米波信号穿透钢筋混凝土墙体衰减超二十分贝，玻璃、金属构筑物的穿透损耗更高。在室内 FWA 接入、楼宇间微波回传、V2X 路侧通信等场景中，信号穿透能力不足会造成接收功率骤降，无法满足高速业务传输要求，制约 5G 微波的城区深度覆盖能力。

3.3. 频谱资源约束与同频干扰

3.3.1. 高频段频谱资源稀缺的核心困境

5G FWA、V2X 及基站回传业务对传输带宽需求持续攀升，仅微波中高频段可提供连续大带宽频谱资源，支撑千兆级传输速率。但全球民用微波频段频谱分配趋于饱和，主流商用频段已被大量无线通信系统占用，可用于 5G 微波通信的连续稀缺频谱资源紧张。为满足大带宽业务需求，5G 微波不得不向毫米波高频段拓展，而高频段天然存在传输损耗大、环境敏感度高的问题，形成频谱资源紧缺与传输性能衰减的双向矛盾，制约民用 5G 微波规模化部署。

3.3.2. 同频与邻道干扰的突出影响

为提升频谱利用效率，民用 5G 网络普遍采用同频组网模式，城区相邻基站、微波回传站点复用相同频段，导致同频干扰成为 5G 微波通信最主要干扰类型。重叠覆盖区域内相邻微波信号相互干扰，直接降低接收端信干噪比，造成传输速率下降、链路抖动。同时不同无线系统共存引发邻道干扰，收发设备非理想滤波特性易产生频谱泄露，对相邻频段微波传输形成串扰，在城区频谱密集部署场景下，邻道干扰的影响进一步放大，严重影响 FWA 宽带接入与 V2X 实时回传的通信质量。

4. 复杂环境下 5G 微波通信的抗干扰改进措施

4.1. 针对信号传播衰减的优化技术

4.1.1. 自适应链路功率控制技术

自适应链路功率控制是应对传输衰减的核心技术，其核心原理是根据信道的实时传输状态，动态调

整发射端的输出功率，在保障接收端信号功率满足解调要求的前提下，实现发射功率的最优配置。自由空间传播损耗的计算公式为

$$L_{fs} = 32.44 + 20 \lg f + 20 \lg d$$

其中 L_{fs} 为自由空间传播损耗，单位为分贝， f 为信号工作频率，单位为兆赫兹， d 为收发两端的传输距离，单位为千米。

接收端实时检测信号功率与信干噪比，将信道状态信息反馈至发射端；发射端依据信道衰减波动动态调节发射功率，衰减增大时提升功率补偿链路损耗，信道条件良好时降低发射功耗，同时减少对周边同频链路的额外干扰。该技术可有效适配城区雨衰、季节气象变化带来的链路波动，保障 5G 微波回传与 FWA 接入链路长期稳定。

4.1.2. 抗雨衰的自适应编码调制方案

自适应编码调制是应对城区突发雨衰、气象衰减的关键方案，根据信道实时质量动态切换编码方式与调制阶数，平衡传输效率与通信可靠性。天气晴好、信道衰减小的场景，采用高阶调制与高编码效率方案，提升链路传输容量；降雨、浓雾等恶劣气象下，信道衰减增大、信干噪比下降，切换为低阶调制与强纠错编码，降低误码率、提升链路抗衰减能力。

$$SINR = \frac{P_r G}{N_0 + I_{total}}$$

其中 $SINR$ 为接收端信干噪比， P_r 为接收信号功率， G 为接收天线增益 N_0 为系统底噪， I_{total} 为总干扰功率。

基于信干噪比的实时检测结果，可建立编码调制方案的切换阈值，不同信干噪比区间对应不同的编码调制组合，实现链路的自适应优化。表 1 为典型的编码调制组合与对应信干噪比阈值，可直接应用于 5G 微波通信的抗雨衰优化。

Table 1. Signal to interference and noise ratio threshold for different encoding modulation combinations

表 1. 不同编码调制组合的信干噪比阈值

调制方式	编码效率	所需最低信干噪比单位为分贝	单载波传输速率单位为兆比特每秒
QPSK	1/2	4.2	100
QPSK	3/4	6.8	150
16QAM	1/2	8.5	200
16QAM	3/4	11.2	300
64QAM	2/3	14.7	400
64QAM	3/4	16.3	450

4.1.3. 链路余量动态优化设计

链路余量是微波链路预留的衰减波动补偿功率，传统固定余量按极端恶劣环境最大损耗配置，常规城区场景下易造成功率与频谱资源浪费。链路余量动态优化依托城区气象衰减统计规律、楼宇遮挡损耗实测数据，结合实时信道状态信息，构建余量动态调整模型。降雨高发季节、楼宇密集遮挡区域适度提升链路余量，应对突发损耗；信道稳定的开阔城区、城郊区域降低预留余量，提升资源利用效率。该方案可在保障链路高可用性的前提下，实现 5G 微波回传与 FWA 场景的资源高效配置。

4.2. 针对视距受限与非视距场景的改进方案

4.2.1. 多跳中继组网与智能反射面辅助传输技术

多跳中继组网是破解城区视距遮挡的基础方案，在楼宇遮挡、地形阻隔区域布设中继站点，将长距离单跳链路拆分为多跳短距离视距链路，逐跳保障传输条件，绕过障碍物实现城区远距离微波回传覆盖。中继站点采用解码转发、放大转发模式，对前序信号整形处理后转发，保障全程传输质量。本文重点聚焦智能反射面辅助传输，针对复杂城区非视距场景，在建筑外立面、楼顶部署智能反射面单元，通过优化反射单元相位控制算法，精准调控入射微波信号的相位偏移，重构传播波束，使非视距反射信号与主路径信号同相叠加，提升接收端信号功率，弥补视距路径遮挡带来的衰减，专门适配城区 5G 微波回传链路的干扰抑制需求。

4.2.2. 大规模 MIMO 波束成形赋形技术

大规模 MIMO 波束成形可同步提升城区微波覆盖能力与抗干扰能力，在收发端部署大规模天线阵列，通过优化天线加权系数生成窄定向波束，将信号能量精准聚焦于目标接收端。以最大化接收端信干噪比为目标，最优加权向量表达式为：

$$w_{opt} = \operatorname{argmax} \frac{|w^H H s^2 \sigma^2 + \sum w^H H_i s_i|^2}{\sum_i |w^H H_i s_i|^2 + \sigma_n^2 w^H w}$$

其中 w_{opt} 为最优加权向量， w 为天线阵列的加权向量， H 为目标信道的信道矩阵， s 为发射信号， σ^2 为噪声功率， H_i 为干扰信道的信道矩阵， s_i 为干扰信号。

通过该优化模型实现波束精准指向，提升目标方向天线增益，抑制旁瓣干扰；窄波束可降低传播损耗、弱化多径干扰，有效改善城区非视距环境下微波回传、V2X 路侧通信的链路质量。

4.2.3. 非视距传输场景专项优化策略

针对城区非视距多径效应问题，采用多径分集接收技术，依托 RAKE 接收机合并不同路径多径信号，提升接收功率同时抑制符号间干扰；搭配正交频分复用技术，将宽带信道划分为多个正交窄带子信道，弱化频率选择性衰落，提升非视距场景传输可靠性。针对楼宇室内 FWA 接入穿透不足问题，采用室内外协同部署模式，在楼宇内部布设微功率微波中继，通过室外宏站与室内中继联动，补齐信号穿透损耗短板，实现城区室内外无缝覆盖。

4.3. 针对频谱约束与同频干扰的管控措施

4.3.1. 动态频谱接入与智能频谱分配技术

动态频谱接入依托认知无线电技术，实时感知城区频谱占用状态，识别空闲频谱资源，动态切换 5G 微波工作频点，规避已占用频段冲突，缓解高频段频谱稀缺压力。智能频谱分配面向城区 FWA 宽带接入、基站回传、V2X 业务进行差异化资源调配，高带宽回传业务分配连续大带宽频谱，低速率物联网、普通宽带业务复用碎片化频谱，实现全网频谱全局最优利用。

4.3.2. 同频干扰协调与规避算法

采用软频率复用方案，将城区覆盖区划分为中心区域与边缘区域，中心区域复用全频段资源，相邻小区边缘区域采用正交频谱配置，从源头规避边缘同频干扰。结合实时干扰检测结果，引入同频干扰动态规避算法，自适应调整链路工作频点与波束指向，避开强干扰时频与空间维度；同时在接收端部署自适应干扰抵消模块，估计并重构干扰信号分量，从接收信号中抵消同频干扰，显著提升信干噪比。

4.3.3. 频谱共享与高效利用方案

通过频谱共享实现 5G 微波与民用雷达、卫星通信、其他无线专网的频段共存，在主业务系统频谱空闲时段，动态接入复用频段，严格控制干扰阈值，实现异系统频谱兼容。采用频谱聚合技术，整合城区离散碎片化频谱，拼接为连续大带宽频谱资源，满足 5G 微波高速率传输需求，解决连续频谱资源短缺难题，适配民用场景规模化部署。

4.4. 其他典型电磁干扰的配套抑制技术

针对城区工业设备、民用电子设备产生的宽频电磁干扰，采用自适应滤波技术，实时跟踪干扰频谱特征并动态调整滤波系数，滤除带外噪声干扰；针对突发脉冲电磁干扰，采用脉冲检测与时域置零技术，精准识别干扰时段并做置零处理，避免解调误码。针对多径效应引发的符号间干扰，引入时域自适应均衡技术，补偿信道频率响应畸变；搭配 LDPC 码、Polar 码等先进信道编码方案，强化系统纠错抗误码能力，全面适配复杂城区各类电磁干扰场景。

5. 结论

本文聚焦复杂城区非视距环境下基于智能反射面的 5G 微波回传链路干扰抑制这一具体研究方向，立足民用 FWA 固定无线接入、V2X 车联网回传、基站无线回传典型场景，首先梳理 5G 微波通信的技术特征与民用应用形态，界定复杂城区通信环境的信道与干扰核心特征，系统剖析城区场景下信号传播衰减、非视距传输受限、频谱资源紧缺、同频邻道干扰四大核心瓶颈。

针对气象与遮挡引发的信号衰减，采用自适应功率控制、自适应编码调制、动态链路余量优化技术，实现链路损耗动态补偿，保障气象时变场景下链路稳定；针对城区非视距传输约束，重点围绕智能反射面辅助传输、多跳中继组网、大规模 MIMO 波束成形技术提出优化方案，突破视距传输限制，提升非视距链路覆盖与抗干扰性能；针对频谱稀缺与同频干扰问题，通过动态频谱接入、干扰协调算法、频谱共享聚合策略，提升频谱利用效率并抑制同频邻道干扰；同时配套自适应滤波、信道编码、时域均衡等技术，实现城区全类型电磁干扰的协同抑制。

后续可进一步围绕智能反射单元相位控制算法、非视距场景资源分配策略开展算法建模与仿真验证，依托城区实测信道模型对比所提算法与传统方案的误码率、吞吐量、信干噪比性能差异，完善 5G 微波回传链路干扰抑制的理论与工程落地体系。

参考文献

- [1] Choukiker, K.Y., Bhowmick, A., *et al.* (2026) 5G and beyond Wireless Network, RF and Microwave Devices: Modern Design and Optimization. CRC Press.
- [2] Yu, Z., Zhang, H., Zhai, R., Liu, L., Xie, X., Du, W., *et al.* (2026) Ti₃C₂T_x MXene Decorated with NiCo₂O₄ Nanocubes Enhances Microwave Absorption Performance for 5G/6G Applications through Engineered Interface Polarization. *Carbon*, **250**, Article ID: 121308. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2026.121308>
- [3] Boro, S., Bhuyan, R.K., Swain, P.K. and Parida, S.K. (2025) A Comprehensive Study on Structure, Microstructure and Microwave-Dielectric Properties of (Mg_{1-x}Ni_x)₂TiO₄ Ceramics (x = 0.00-0.08) for 5G Wireless Communications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **36**, 2178-2178. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-16268-8>
- [4] Guo, B., Li, X., Wu, Y. and Yao, Q. (2025) A Hydantion Epoxy Resin Gel Casting of MgTiO₃-CaTiO₃ Ceramics and Its Application for 5G/6G Waveguide Filter. *Ceramics International*, **51**, 48075-48083. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.08.067>
- [5] Zhu, W., Wang, X., Liu, F., Zhang, Z., Yao, Z., Liu, H., *et al.* (2025) Phonon Characteristics, Dielectric Respond Mechanism, Structure-Property Relationships of (1-x)SrSn(BO₃)_{2-x}TiO₂ Microwave Dielectric Ceramics with Low Permittivity and Their Application for 5G Microstrip Patch Antenna. *Ceramics International*, **51**, 44901-44910. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.211>

-
- [6] Zhang, N., Zhang, Z., Xue, S., Wang, X., Wang, T., Sun, P., *et al.* (2023) Dual-Mode Anti-Interference Humidity Detection: Differential Microwave Sensor Based on Microstrip Circuit. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **390**, Article ID: 133944. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.133944>
- [7] Le, T.T. and Tran, H.H. (2019) Ultrawideband High-Gain Dual-Polarized Antenna with Anti-Interference Capability. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, **29**, e21814. <https://doi.org/10.1002/mmce.21814>
- [8] Baher Safa Hanbali, S. (2018) A Review of Radar Signals in Terms of Doppler Tolerance, Time-Sidelobe Level, and Immunity against Jamming. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, **10**, 1134-1142. <https://doi.org/10.1017/s1759078718001174>
- [9] Nguyen, H., Kim, K., Han, S., Lee, J., Kim, C. and Lee, S. (2018) A Low-Power Interference-Tolerance Wideband Receiver for 802.11af/ah Long-Range Wi-Fi with Post-LNA Active *N*-Path Filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **66**, 2287-2298. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2018.2805341>