

基于超材料龙勃透镜双波束射灯天线的楼宇覆盖 解决方案研究

来平¹, 汪永寿¹, 黄景民², 杜发辉¹

1. 中国铁塔股份有限公司青海省分公司, 青海 西宁 810001

2. 佛山市粤海信通讯有限公司, 广东 佛山 528100

DOI: 10.61369/TACS.2025110026

摘要 : 随着移动通信网络的深度发展, 高密度、高层楼宇的优质覆盖成为网络建设的关键挑战。射灯天线楼间对打技术提供了一种快速部署的应用方案, 提出一种基于超材料实现的龙勃透镜双波束射灯天线。该天线利用龙勃透镜的波束聚焦特性和超材料对电磁参数的灵活调控能力, 实现了高达 17dBi 的增益和垂直方向约 65° 的覆盖张角, 有效解决了高层楼宇的深度与均匀覆盖问题。同时, 其球形可旋转结构支持垂直与水平双波束模式的快速切换, 适应多样化场景需求。

关键词 : 超材料; 龙勃透镜; 射灯天线; 楼宇覆盖; 信号升格; 共建共享

Research on Building Coverage Solution Based on Metamaterial Luneburg Lens Dual - beam Spotlight Antenna

Lai Ping¹, Wang Yongshou¹, Huang Jingmin², Du Fahui¹

1.Qinghai Branch, China Tower Corporation, Xining, Qinghai 810001

2.Foshan Yuehaixin Communication Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528100

Abstract : With the in-depth development of mobile communication networks, high-quality coverage of high-density and high-rise buildings has become a key challenge in network construction. The inter-building opposite-shooting technology of spotlight antennas provides a rapidly deployable application solution. This paper proposes a Luneburg lens dual-beam spotlight antenna based on metamaterials. By utilizing the beam focusing characteristics of the Luneburg lens and the flexible electromagnetic parameter regulation capability of metamaterials, the antenna achieves a high gain of up to 17 dBi and a vertical coverage angle of approximately 65°, which effectively addresses the problems of deep and uniform coverage in high-rise buildings. Meanwhile, its spherical rotatable structure supports fast switching between vertical and horizontal dual-beam modes, adapting to diverse scenario requirements.

Keywords : metamaterial; luneburg lens; spotlight antenna; building coverage; signal enhancement; co-construction and sharing

引言

在城市化进程加速的背景下, 居民小区高层楼宇的数量激增, 楼宇的深度覆盖已成为人们生活中对网络体验提升的关键指标。通过传统室内分布系统是解决楼宇覆盖的较优方案, 通过在楼宇室内布放无源天线或者是小基站, 将信号均匀分布至各个角落, 但传统室分系统的建设往往伴随着施工周期长、初期投入巨大、穿梁打洞对建筑结构有影响以及与物业协调困难等诸多难题, 尤其在存量楼宇小区改造中, 实施难度极大^[2]。为突破传统射灯天线的性能桎梏, 本研究引入基于超材料技术的龙勃透镜双波束射灯天线。龙勃透镜是一种经典的球形梯度折射率透镜, 具有将点源发出的球面波转换为平面波(准直)或将平行入射的平面波聚焦于另一点(汇聚)的特性, 从而实现高增益和可控波束^[3]。本文提出的超材料龙勃透镜双波束射灯天线, 正是结合了龙勃透镜的波束整形优势和超材料的灵活设计能力。通过精确设计超材料单元结构, 构建出具有连续或准连续梯度折射率分布的球形透镜, 进而激励出高增益、宽波束的双波束模式^[10]。

作者简介

1. 来平, 工程师, 硕士毕业于西安邮电大学, 现任职于中国铁塔股份有限公司青海省分公司, 从事通信基础设施建设运营及科技创新工作。
2. 汪永寿, 高级工程师, 本科毕业于西安交通大学, 现任职于中国铁塔股份有限公司青海省分公司, 从事移动天线通信工程及项目建设工作。
3. 黄景民, 高级工程师, 本科毕业于北京邮电大学, 现任职于佛山市粤海信通讯有限公司, 从事移动通信天线及覆盖关键技术研究工作。
4. 杜发辉, 正高级工程师, 工程硕士毕业于重庆邮电大学, 现任职于中国铁塔股份有限公司青海省分公司, 从事移动天线通信关键技术研究工作。

一、传统楼宇覆盖方案及其局限性

（一）传统射灯天线楼间对打优缺点分析

射灯天线楼间对打作为一种快速覆盖方案，目前在居民小区覆盖中得到广泛采用。通常选择在目标楼宇对面视野良好的楼顶，架设简易抱杆，安装大张角垂直波束射灯天线，通过接入信源后将信号定向发射至目标楼宇^[4]。其优势是部署快捷，仅需在对面楼顶安装设备和天线，无需进入目标楼宇内部施工，大大缩短了部署周期。建设成本较低，省去了大量的线缆和室内设备，初期建设成本显著低于室内分布系统。物业协调简单，主要协调对面楼顶的站址获取，难度相对较低。缺点是传统射灯天线增益不足，传统射灯天线受限于尺寸和设计，增益通常在13dBi左右。对于30层楼宇，信号需穿透厚重的墙体，即使天线对准楼宇中部，底层接收到的信号强度也往往不足，难以满足覆盖要求。这些局限性使得传统射灯天线在面对30层及以上的超高层楼宇时，覆盖效果大打折扣，要么形成“中间强、两头弱”的覆盖剖面，要么需要部署多副天线分别覆盖不同楼层，反而增加了部署的复杂度和成本^[9]。

二、超材料龙勃透镜双波束射灯天线原理与技术优势

（一）龙勃透镜天线基本原理

龙勃透镜是一种理想的渐变折射率介质球透镜，其折射率 $n(r)$ 从球心到球面按特定规律递减，通常设计为 $n(r) = n_0 \sqrt{2 - (r/R)^2}$ ，其中 R 为球体半径， r 为球心到径向某点的距离， n_0 为球心处的最大折射率。这种梯度折射率分布使得从球面一点发出的球面波在透镜内部传播时，其等相位面逐渐变为平面，并在另一侧的球面上的一点会聚成球面波，实现聚焦。在天线应用中，通常将馈源置于龙勃透镜的对焦点或特定位置，可以将点源辐射的球面波转换为高增益的平面波束（出射），或将来自特定方向的平面波高效会聚到馈源（接收）。通过设计透镜的渐变折射率分布和馈源位置，可以控制出射波束的宽度、方向和增益^[5]。

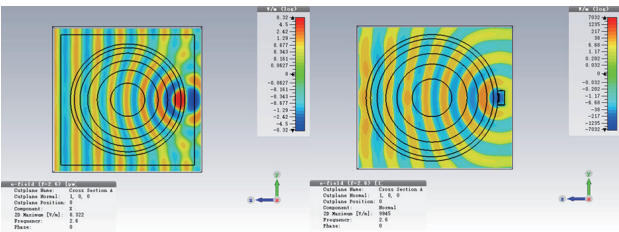


图1 龙勃透镜场强仿真响应图

（二）双波束形成与性能参数

本文提出的创新方案核心创新在基于楼宇垂直方向上利用超材料龙勃透镜实现了双波束输出，分别在高层区域与低层区域输出对应的两个波束指向，每个波束的增益均达到了17dBi，进一步细化整栋楼宇的深入覆盖。高增益实现方案，天线基于龙勃透镜本身具有波束汇聚和准直的特性，能够将能量集中在特定方向获得高增益特性，通过在透镜的焦点部署对应的阵子馈源，天线增益最高可达17dBi^[6]。宽垂直波束覆盖方案，通过在龙勃透镜

的垂直方向对称位置设置两个馈源，或通过单个馈源激励起两个主模并控制其相位和幅度，可以形成两个在垂直方向上分离的波束。每个波束的垂直半功率波束宽度设计为约30°，波束指向是±20°。这两个波束的中心轴可以分别指向楼宇的中上部和下部区域。单个天线就能同时覆盖楼宇的上下部分，合成后的垂直覆盖角度约为65°。这有效解决了传统天线垂直覆盖不足的问题，实现了从底层到顶层的更均匀覆盖。

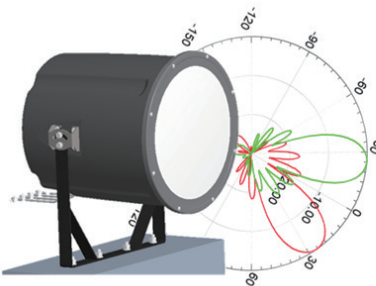


图2 超材料透镜射灯天线产品即波束指向示意图

三、应用成效与政策契合

（一）应用案例

青海西宁三榆柏朗峰为我市高端用户聚集地，为确保高端客户感知，本次应用试点方案主要针对7栋30层高层楼宇覆盖。原有的覆盖方案是分别在对面的楼栋顶楼以及地面分别部署2个点位的传统射灯天线进行覆盖，现试点方案是使用一副超材料透镜射灯天线在对面的点位进行全部覆盖。三榆柏朗峰七栋采用超材料透镜射灯天线覆盖楼体后，单天线满足移动，联通，电信1-29楼北侧全覆盖，其中移动整体RSRP提升2-13dB左右，电信整体提升2-20dB，联通整体提升4-17dB，全面提升整体用户感知，客户满意度直线上升。

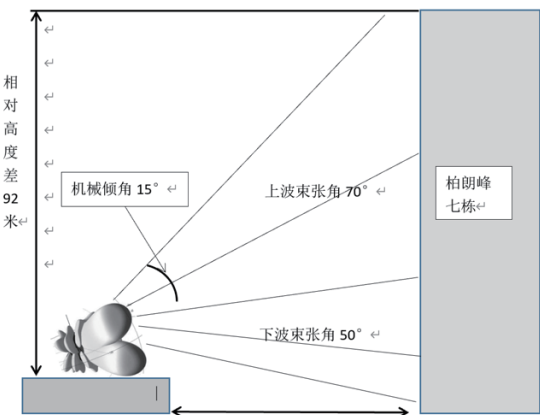


图3 青海西宁超材料透镜天线试点应用方案

（二）响应国家工信部“信号升格行动”要求

工信部提出的“信号升格行动”旨在推动移动网络质量提升，重点解决包括高层楼宇在内的重点场景覆盖难题^[1]。对于中国铁塔这类通信基础设施服务提供商而言，该天线具有重要的应用价值，共建共享潜力大，高性能的天线可以更好地满足多家运

营商在同一区域的覆盖需求，促进站址和天面的共建共享，提高资源利用率。降低建设与运维成本，单天线覆盖、快速部署的特点，减少了天线数量、铁塔荷载、施工周期和维护工作量，从而降低了整体 TCO。符合低碳环保理念：减少设备数量和施工环节，直接或间接降低了材料消耗和碳排放，契合国家“双碳”目标和绿色网络建设要求^{[7][8]}。通过提升覆盖效率，避免了因覆盖不足而盲目增加基站数量所带来的资源浪费和环境压力。

四、结论

针对传统室内分布系统和射灯天线在高层楼宇覆盖中存在的

不足，本文提出并研究了基于超材料实现的龙勃透镜双波束射灯天线。该天线通过超材料精确调控电磁参数，构建梯度折射率分布的球形透镜，成功将天线增益提升至17dBi，并利用双馈源设计实现了垂直方向约65°的宽波束覆盖。这一技术突破有效解决了30层及以上超高层楼宇的深度覆盖和均匀覆盖难题。同时，其球形可旋转结构赋予了天线垂直 / 水平双波束模式快速切换的能力，增强了场景适应性。从移动通信覆盖角度看，该天线显著提升了信号质量和用户体验，减少了部署复杂度。从电磁场专业角度看，其高增益和可控波束特性体现了对电磁能量传播的精细调控。随着超材料技术的不断发展和成本的降低，此类创新天线有望在未来的移动通信网络建设中发挥更重要的作用。

参考文献

[1] 《关于开展“信号升格”专项行动的通知》解读，工业和信息化部，2024。
[2] 张平，崔琪楣. 第五代移动通信技术导论. 中国科学技术出版社，2021。
[3] 王开民，王汀. 龙勃透镜天线及其应用 [J]. 卫星电视与宽带多媒体. 2007, (02): 32-33.
[4] 郭晓明. 分布式射灯天线在小区深度覆盖中的应用研究 [J]. 通信世界, 2020(14): 2.
[5] 聂博宇，朱少园，卢宏达，等. 太赫兹金属多波束透镜天线设计 [C]//2024 年全国微波毫米波会议（中国微波年会）. 北京理工大学集成电路与电子学院，2024。
[6] 聂博宇，朱少园，卢宏达，等. 太赫兹金属多波束透镜天线设计 [C]//2024 年全国微波毫米波会议论文汇编（下册）. 2024。
[7] 王清勤. 推动绿色建筑和绿色建材协同发展助力建筑领域实现“双碳”目标 [J]. 新型建筑材料, 2023(11).
[8] 付艳景. 地方政府多政策目标治理与城市绿色低碳转型研究 [D]. 东北财经大学，2023。
[9] 赵佳春. 大张角射灯天线在小区深度覆盖场景中的应用分析 [J]. 电脑与电信, 2021(012): 000.
[10] 吴超. 一种高层楼宇室内深度覆盖解决方案 [J]. 信息通信, 2018(4): 2.