

居民楼宇电梯覆盖场景难题的创新方案

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.2025110025

摘 要 : 随着工信部 " 信号升格行动 " 的深入推进, 为更好的优化高层楼宇的深度覆盖质量^[1], 本文针对电梯井金属轿厢带来的信号覆盖难题, 提出了一种基于菲涅尔平面透镜波束聚焦特性的超材料电梯天线解决方案。青海铁塔公司通过联合项目对电磁场理论仿真分析与工程设计实践, 研发增益高达 20.5dBi 的超材料电梯天线, 覆盖能力提升至 30 层以上楼宇应用。实测结果表明, 该方案在信号稳定性、施工便捷性和成本控制方面均显著优于现有覆盖技术, 为城区大中型住宅及商务楼宇提供了高效的信号覆盖解决方案。

关 键 词 : 信号升格行动; 电梯信号覆盖; 菲涅尔透镜; 超材料天线; 电磁波束聚焦

Innovative Solution to Signal Coverage Challenges in Residential Building Elevators

Lai Ping¹, Wang Yongshou¹, Huang Jingmin², Du Fahui¹

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

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

Abstract : With the in-depth advancement of the Ministry of Industry and Information Technology's "Signal Enhancement Campaign"^[1], to better optimize the deep coverage quality of high-rise buildings, this paper proposes an innovative metamaterial elevator antenna solution based on the beam focusing characteristics of Fresnel planar lenses, aiming at the signal coverage challenges caused by the metal car of elevator shafts. Through the joint project's electromagnetic field theoretical simulation analysis and engineering design practice, China Tower Qinghai Branch has developed a metamaterial elevator antenna with a gain as high as 20.5 dBi, whose coverage capability is upgraded to meet the application needs of buildings with more than 30 floors. Field test results show that this solution is significantly superior to existing coverage technologies in terms of signal stability, construction convenience and cost control, providing an efficient signal coverage solution for large and medium-sized residential and commercial buildings in urban areas.

Keywords : signal enhancement campaign; elevator signal coverage; fresnel lens; metamaterial antenna; electromagnetic beam focusing

引言

移动通信网络的深度覆盖是数字中国建设的基石, 电梯作为现代建筑中不可或缺的一部分, 其信号覆盖质量直接影响用户体验。电梯轿厢为金属密闭结构, 对电磁波产生较强的屏蔽效应, 形成信号盲区^[3]。传统的解决方案如普通天线、电梯宝和漏缆覆盖系统等, 分别存在覆盖楼层数量有限、稳定性差或成本过高等问题, 难以满足日益增长的数据业务需求。菲涅尔平面透镜作为一种基于波束聚焦原理的电磁波元件, 可通过特殊的超材料结构实现电磁波束的定向传输。本文将这一技术应用于电梯信号覆盖领域, 设计出一款具有高增益、宽带宽特性的超材料电梯天线, 并对其性能进行系统测试与分析, 为居民楼宇场景的实施提供了有效的技术路径。^[2]

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、电梯信号覆盖挑战

（一）电梯信号覆盖的特殊挑战

电梯信号覆盖面临多重技术挑战，电磁屏蔽效应：电梯井通常由钢筋混凝土和金属板材构成，形成法拉第笼效应，严重阻碍外部电磁信号的穿透。实测表明，在电梯轿厢内，信号强度可能衰减20–30dB以上，导致通话质量下降甚至中断。多径衰落现象：电梯井为狭长封闭空间，电磁波在金属壁之间产生多次反射，形成严重的多径传播，导致信号幅度快速起伏，影响通信稳定性。动态覆盖需求：电梯轿厢处于持续运动状态，要求覆盖系统能够实现无缝切换，避免在移动过程中出现通话中断或数据重传。安装维护困难：电梯作为特种设备，安装维护窗口有限，要求覆盖设备具备高可靠性和简易维护特性，以减少对居民生活的影响。

二、超材料电梯天线创新解决方案

（一）菲涅尔平面透镜原理与设计

菲涅尔平面透镜是一种基于波前相位调制原理的电磁器件，其设计思想源于光学菲涅尔波带片。传统透镜通过改变电磁波传播路径中的相位速度来实现波前重构，而菲涅尔透镜则通过相位补偿原理，将传统透镜的连续曲面离散化为一系列同心环带，从而在保持聚焦能力的同时大幅减小器件的厚度和重量^[4]。超材料作为一种人工复合材料结构，其电磁特性取决于单元结构，通过仿真设计超材料的介电常数渐变单元结构，可以实现对电磁波振幅、相位和极化状态的灵活调控^[5]。将超材料结构与菲涅尔透镜设计相结合，实现了超材料菲涅尔平面透镜天线，其核心技术特点包括：相位补偿设计：根据菲涅尔波带片原理，将透镜表面划分为多个同心环带，每个环带对应特定的相位延迟量。通过调节超材料单元的几何参数，实现从中心到边缘递增的相位补偿，使通过透镜不同位置的电磁波在焦点处实现同相叠加，从而形成高增益波束。阻抗匹配优化：在超材料单元设计中，采用多层级联结构和渐变介电常数设计，实现空气与透镜之间的良好阻抗匹配，减少表面反射，提高能量传输效率。实测显示，优化后的透镜表面反射系数低于-15dB，能量效率提升25%以上。

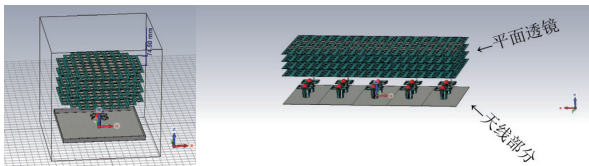


图1 菲涅尔平面透镜仿真模型

（二）天线结构与性能优化

基于菲涅尔平面透镜原理，设计了专用于电梯信号覆盖的超材料天线。天线结构主要包括馈源阵子、超材料透镜体和防护外壳三部分：馈源设计：采用宽带全波阵子作为馈源，工作频率覆盖1710–3700MHz，电压驻波比小于1.5，为透镜提供均匀的馈源发射与接收点。透镜结构：透镜采用电磁超材料颗粒多层喷涂工

艺制作，天线系统由多块菲涅尔平面透镜单元组合而成，便于根据电梯井天线单元尺寸灵活调整口径。波束聚焦机制：当馈源阵子信号辐射到透镜表面时，不同位置的超材料单元对波前进行相位重整，通过精确控制各环带的相位补偿量，使电磁波在电梯井方向形成高方向性波束，增益达到20.5dBi，远超传统天线的13–15dBi水平^[6]。为验证设计效果，利用电磁仿真软件对天线性能进行了系统分析。仿真结果表明，在2.6GHz工作频率下，天线半功率波束宽度为15.6度，旁瓣电平低于-18dB，前后比大于25dB，展现出优异的定向辐射特性。

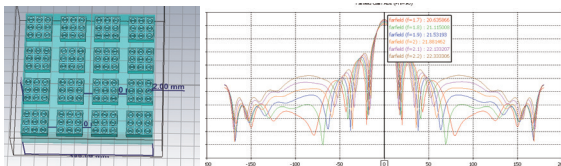


图2 菲涅尔平面透镜仿真响应图

三、性能测试与应用效果分析

（一）测试环境与方法

为客观评估超材料电梯天线的实际性能，在青海西宁中惠紫金城16栋33层高层住宅楼进行了系统测试。测试环境为电梯井结构，电梯速度2.5m/s，楼高约100米。测试点均匀分布在每个楼层的电梯轿厢内，重点考察1.8GHz频段的信号覆盖效果。测试设备包括：超材料电梯天线（安装在电梯井顶部）、信号源（基站拉远）、测试手机等。测试指标主要是信号接收功率（RSRP）关键性能指标。



图3左：原增益15dBi电梯天线；图3右：替换后增益20.5dBi超材料天线

（二）测试结果与分析

经过为期一周的系统测试，天线口馈入功率为2W情况下，超材料电梯天线展现出优异的性能表现：覆盖范围：在32层建筑中，单天线即可实现全程覆盖。RSRP值分布在-74dBm至-99dBm之间，优于传统天线方案约14–20dB。即使在最远的底层位置，RSRP仍优于-99dBm，完全满足商用需求。信号质量：SINR值在整个电梯运行过程中保持在10dB以上，波动范围小于3dB，表明信号稳定性良好。切换性能：由于采用单天线覆盖整个电梯井，电梯运行过程中无需进行小区切换，解决了因切换失败导致的通话中断问题。测试期间，语音通话零中断，视频通话流畅无卡顿。

四、技术优势与推广价值

超材料电梯天线方案集成了多项技术优势，使其成为当前电梯信号覆盖的最优解决方案：覆盖性能显著提升：20.5dBi 的高增益和精准的波束定向能力，使单天线覆盖高度从传统方案的13层提升至30层以上，满足了大多数城市建筑的需求。波束聚焦特性减少了电磁能量扩散，提升了功率利用效率，降低了空间电磁污染。成本效益突出：相比漏缆方案，超材料天线的综合成本（包括设备、安装和维护）可降低60% 以上，且覆盖效果相当甚至更

优。对于电梯数量众多的住宅小区和商务楼宇，这一成本优势尤为明显^{[7][8]}。提升用户体验：优质的电梯内信号覆盖确保了移动通信的连续性，消除了 " 进电梯即断线 " 的痛点，直接提升了用户满意度，符合 " 信号升格行动 " 以人民为中心的发展思想。其通信能力直接影响物联网设备联动和数字化服务体验，为楼宇数字化转型提供支撑。支持绿色低碳：无源天线系统无需供电，能耗为零；高增益特性降低了基站发射功率需求，间接减少了网络整体能耗，符合绿色低碳发展理念^{[9][10]}。

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] 袁录. 4G 网络深度与广度覆盖提升策略研究 [J]. 通讯世界，2021。
[4] 洪孝荣. 基于介质超构表面的太赫兹波相位调制的理论研究 [D]. 中央民族大学，2020。
[5] 柏林. 超材料对电磁波束与声波束调控研究 [D]. 东南大学，2022。
[6] 朱潜，田翰闾，蒋卫祥. 电磁超表面对辐射波的调控与应用 [J]. 光电工程，2023, 50(9): 15-29。
[7] 李雄，马晓亮，罗先刚. 超表面相位调控原理及应用 [J]. 光电工程，2017, 44(03): 255-275+376。
[8] 江梅，玄晓波，商远波，等. 基于分裂环超材料单元的双频圆极化平面反射阵天线 [C]//2020。
[9] 任炫宇. 基于提升电梯维保人员用户体验的产品系统创新研究 [J]. 艺术科技，2024(19)。
[10] 王紫英. 基于日常生活中互联网金融应用的用户体验设计方法研究 [J]. 信息产业报道，2023(1): 0172-0174。