

# 超表面天线对地下空间电磁环境的辐射安全分析

李欣鸿<sup>1</sup> 周文颖<sup>1,2</sup> 王盼盼<sup>3</sup> 逯迈<sup>1</sup> 马踊<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室 兰州 730070)

<sup>2</sup>(毫米波全国重点实验室 南京 210096)

<sup>3</sup>(兰州交通大学电子与信息工程学院 兰州 730070)

**摘要** 为了改善地下空间无线通信质量,本研究设计了一种基于圆环结构的超表面天线,其工作频段为4.717~5.206 GHz,带宽489 MHz,最大增益9.7 dBi。对比分析了传统天线与超表面天线在地上与地下环境中的电场强度与接收功率分布,并研究了人体在上述环境中的电磁暴露安全性。研究结果表明:超表面天线在地上环境中,可将电场强度最大值提升67%,将接收功率最大值提升12.24 dBm,且覆盖范围更广;在地下环境中,可将电场强度最大值提升263.1%,将接收功率最大值提升11.62 dBm,使无线信号分布更均匀;地上二楼与地下二楼在特定阈值下的信号覆盖面积分别平均提升了5.66%和9.25%。此外,超表面天线辐射下,地下一楼空间的电场强度最大,对应的场强值为3.254 V/m,在该环境中人体的10 g平均比吸收率(Specific absorption rate, SAR)最大值仅为 $4.433 \times 10^{-6}$  W/kg,远低于国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)规定的公众暴露限值。综上所述,本研究所提出的超表面天线不仅能够有效克服地下空间环境中无线信号的快速损耗,提升通信覆盖能力,还能保证地下电磁环境的安全性,为优化地下封闭空间内的无线通信部署提供了新的思路。

**关键词** 超表面天线, 地下空间, 无线通信信号覆盖, 电磁环境安全性, 电磁暴露安全评估

中图分类号 TN929.5

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0118

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0118

引用该文:

李欣鸿,周文颖,王盼盼,等.超表面天线对地下空间电磁环境的辐射安全分析[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(XX):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0118.

LI Xinhong, ZHOU Wenying, WANG Panpan, *et al.* Radiation safety analysis of metasurface antennas in underground space electromagnetic environments[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0118.



基金资助: 国家自然科学基金项目(62161017, 52467026)、兰州市青年科技人才创新项目(2025-QN-072)与东南大学毫米波全国重点实验室(KN202502-03)

第一作者: 李欣鸿,男,2001年1月出生,2023年毕业于重庆邮电大学,现为兰州交通大学硕士研究生,研究方向为轨道交通中的电磁兼容

通信作者: 周文颖,博士,教授,博士生导师, E-mail: zhouwy29@126.com

收稿日期: 初稿 2025-12-09; 修回 2026-02-04

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62161017, 52467026), the Lanzhou Youth Science and Technology Innovation Project (2025-QN-072), and State Key Laboratory of Millimeter Waves (KN202502-03)

First author: LI Xinhong (male) was born in January 2001, and obtained a bachelor's degree from Chongqing University of Posts and Telecommunications in 2023. Now he is a graduate student at Lanzhou Jiaotong University

Corresponding author: ZHOU Wenying, doctoral degree, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhouwy29@126.com

Received 09 December 2025; accepted 04 February 2026

## Radiation safety analysis of metasurface antennas in underground space electromagnetic environments

LI Xinhong<sup>1</sup> ZHOU Wenyong<sup>1,2</sup> WANG Panpan<sup>3</sup> LU Mai<sup>1</sup> MA Yong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Key Laboratory of Opt-Electronic Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

<sup>2</sup>(State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

<sup>3</sup>(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**ABSTRACT** To improve the quality of wireless communication in underground spaces, this study designs a metasurface antenna based on a circular ring structure. The antenna operates in the 4.717–5.206 GHz frequency band, with a bandwidth of 489 MHz and a peak gain of 9.7 dBi. The distributions of electric field strength and received power for both the metasurface antenna and a conventional antenna are comparatively analyzed in above-ground and underground environments. Furthermore, the electromagnetic exposure safety of the human body in these environments is investigated. The results demonstrate that in above-ground environments, the metasurface antenna increases the maximum electric field strength by 67% and the peak received power by 12.24 dBm, providing broader coverage. In underground environments, it enhances the maximum electric field strength by 263.1% and the peak received power by 11.62 dBm, leading to a more uniform signal distribution. The average signal coverage area under specific thresholds is improved by 5.66% on the second above-ground floor and 9.25% on the second underground floor, respectively. Additionally, under metasurface antenna radiation, the peak electric field strength on the first underground floor reaches 3.254 V/m, where the maximum 10 g averaged Specific Absorption Rate (SAR) for the human body is only  $4.433 \times 10^{-6}$  W/kg, far below the public exposure limits specified by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). In summary, the proposed metasurface antenna effectively overcomes the rapid attenuation of wireless signals in underground spaces, enhances communication coverage, and ensures the safety of the electromagnetic environment, providing a new perspective for optimizing wireless communication deployment in enclosed underground areas.

**KEYWORDS** Metasurface antenna, Underground space, Wireless communication signal coverage, Electromagnetic environment safety, Electromagnetic exposure safety assessment

**CLC** TN929.5

在全球城市化加速的背景下，地下空间的科学开发利用已成为缓解城市用地紧张、优化空间布局的关键手段。地铁、地下停车场、地下商场等设施的大规模建设，使地下空间逐渐成为居民日常活动的重要场所。然而，地下环境具有明显的封闭性和结构复杂性，其内部大量使用的混凝土、金属构件等材料严重阻碍电磁波的传播，导致信号衰减显著、多径效应增强、时延扩展加剧，严重影响无线通信质量，对 Wi-Fi、5G/6G 等现代通信技术的部署与应用构成严峻挑战。已有研究表明，地下隧道等封闭空间中的无线信道呈现独特的传播特性，其路径损耗需采用混合模型进行精确描述<sup>[1]</sup>，对通信覆盖终端天线有了更高的要求。在既有应对策略中，提高天线输入功率是增

强信号覆盖的一种常见手段。通过增加基站密度或提升发射功率，可在一定程度上补偿路径损耗，改善通信质量，但会显著提高建设和运营成本，且会引发电磁兼容（Electromagnetic compatibility, EMC）问题，导致设备间干扰加剧、系统整体性能下降，及潜在的环境与健康风险<sup>[2-4]</sup>。此外，传统天线缺乏对电磁波传播方向的灵活调控能力，信号在遇到障碍物时容易因散射和吸收造成能量损失。因此，针对地下空间的特殊电磁传播特性，亟需探索不单纯依赖提高发射功率的新型通信天线，以兼顾覆盖效果与电磁暴露安全性需求。

已有研究针对地铁隧道内不同制式的民用通信系统进行了电磁环境预测与风险分析<sup>[5]</sup>，及利用超表面结构提升 5G 通信质量并兼顾电磁暴露安

全的重要手段<sup>[6]</sup>。文献[7]中，基于超材料单元的小型化轨旁天线，在提升通信性能的同时，亦可降低对隧道内工作人员的辐射影响，证明了人工电磁结构在改进电磁暴露源方面的潜力。作为人工设计的二维超材料<sup>[8-11]</sup>，其由亚波长单元阵列所构成，可高精度调控电磁波传播。它具有更加轻薄、设计更加灵活、覆盖更好等优点，尤其重要的是，它还能随环境调整信号传输方向，增强电磁波定向性<sup>[12-13]</sup>。超表面的核心是通过设计超材料单元结构的形态、尺寸、排布，实现对电磁波相位、振幅、极化及传播路径的非均匀调控<sup>[14-15]</sup>。2014年崔铁军院士团队首次演示超表面与天线的动态协同工作<sup>[16]</sup>，随后超表面的应用是将其加载在天线上，使得天线可以获得更好性能表现。由于超表面与天线的结合能够通过相位调节、波束控制和信号增强，实现更广泛的信号覆盖和更强的穿透能力。毫米波频段在室内环境中的传播特性研究显示，射线追踪方法能有效预测信号衰减、延迟扩展等参数，为超表面天线在复杂环境中的性能优化提供了参考<sup>[17]</sup>。同时，5G NR信号在3.565 GHz频段的地空信道测量分析进一步验证了高频段信号在动态环境中的传播机制，强调了定向天线和波束成形技术在提升覆盖质量方面的作用<sup>[18]</sup>，因此，本文将透射型超表面与矩形微带缝隙天线相结合，设计了一款能够覆盖5G n79频段的超表面天线，以克服电磁波在地下空间的多径反射。天线单元采用ANSYS HFSS软件进行设计与优化，并获取其远场方向图。随后，将该数据

导入Altair电磁仿真套件进行室内场景建模和无线覆盖仿真分析。通过对比分析传统天线与超表面天线工作在4.9 GHz频率时，地上与地下空间的电场强度和接收功率分布，以验证所设计超表面天线的优越性，并对其辐射下电场强度最大的区域进行了电磁暴露安全评估，结果表明，超表面天线在上述环境中均表现出更优异的通信性能，且对人体组织的辐射影响远低于ICNIRP标准。这为解决地下空间5G信号覆盖问题，及评估该电磁环境的安全性提供了有力的理论依据和数据支持。

## 1 超表面天线设计和性能仿真

### 1.1 透射型超表面天线设计

本文所设计的超表面天线由上层透射型超表面和下层矩形微带缝隙天线所构成，其天线整体结构，圆环结构和矩形微带缝隙天线结构如图1所示。两层介质板均使用F4B材料，相对介电常数为2.65，损耗角正切为0.002，长宽分别为 $L_1$ 、 $L_2$ ，上层介质板厚度为 $W_1$ ，下层厚度 $W_2$ ，两层介质板中间相隔高度为 $h$ 。上层超表面由金属圆环排列构成，材料为理想电导体，每两个圆环圆心之间的间距为 $g$ ，圆环的外半径 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 从内向外逐渐减小，内半径均为 $r_4$ 。下层介质板的上方为开了矩形缝隙的金属板，材料为理想电导体，矩形缝隙的长宽分别为 $L_5$ 、 $L_6$ 。微带线的长宽分别为 $L_4$ 、 $L_3$ 。超表面天线的参数值见表1。

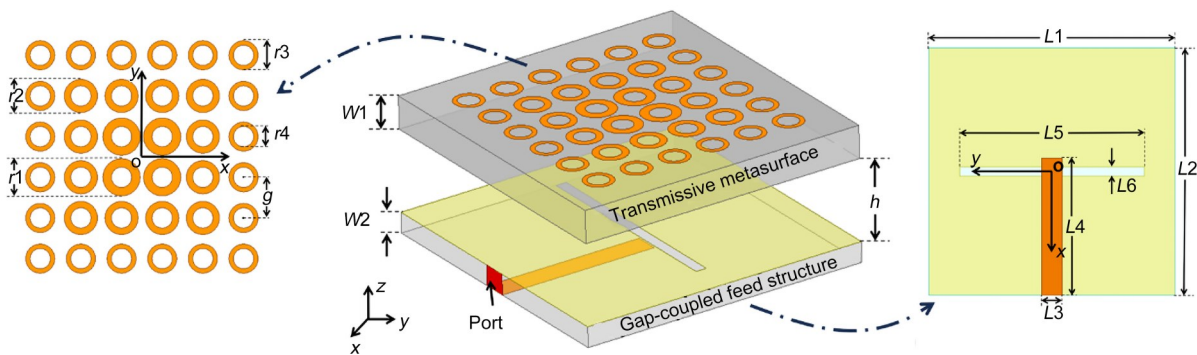


图1 超表面天线结构图  
Fig.1 Structure diagram of the metasurface antenna

表1 超表面天线结构尺寸  
Table 1 Metasurface antenna structure dimensions

结构参数 Structure parameters	$W_1$	$W_2$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$
尺寸 Size / mm	1.3	1	72	72	5.9	40	54
结构参数 Structure parameters	$L_6$	$g$	$h$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$
尺寸 Size / mm	2.7	10	4	4.6	4.1	3.6	2.5

## 1.2 天线性能仿真分析

将本文中所设计的超表面天线与传统室内天线（其结构如图2所示）的辐射性能进行对比分析。利用仿真软件对上述两种天线的回波损耗、增益和辐射方向图进行模拟仿真，天线的S参数仿真结果如图3所示（其中 $S_{11}$ 为反射系数）。从图3中可以看出，传统天线的工作频段为4.764~4.936 GHz，带宽约为172 MHz，所设计的超表面天线在4.9 GHz处 $S_{11}$ 达到-45 dB，其工作频段拓宽至4.717~5.206 GHz，带宽约为489 MHz。这表明相较于传统室内天线，超表面天线在4.9 GHz频段与馈线有更加良好的匹配效果，入射能量辐射效率和工作带宽显著提升。

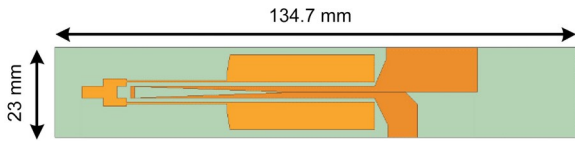


图2 传统室内贴片天线结构图  
Fig.2 Structure diagram of conventional patch antenna

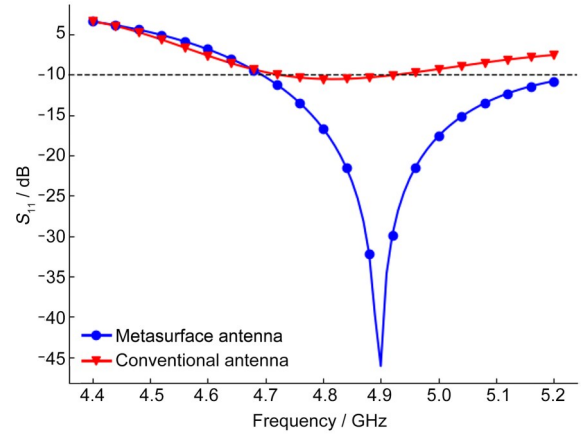


图3 两种天线的S参数仿真结果对比  
Fig.3 Comparison of S-parameter simulation results of two antennas

进一步观察图4可知，在4.9 GHz的频段下，传统室内天线的端射方向增益为2.25 dBi，超表面天线的端射方向增益提升至9.7 dBi。上述结果表明，超表面天线的能量定向辐射性能更优。

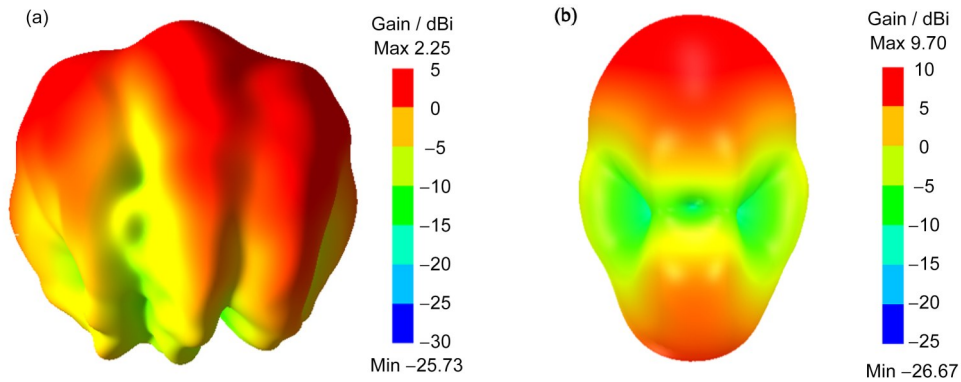


图4 两种天线的增益对比:(a)传统贴片天线;(b)超表面天线(彩色见网络版)  
Fig.4 Gain comparison of two antennas: (a) conventional patch antenna; (b) metasurface antenna (color online)

## 2 实验场景建模

### 2.1 模型概述

为了研究天线在地上空间和地下空间的电场强度和接收功率分布，本实验基于实际室内场景

建立了一个两层楼室内模型，如图5(a)所示。每层楼的高度为3 m，墙体由厚度为30 cm的砖块组成（相对介电常数 $\epsilon_r=4$ ，电导率 $\sigma=0.111$  S/m），每层楼设有材质为5 mm厚的玻璃窗户（ $\epsilon_r=6$ ， $\sigma=0.014$  S/m）和材质为5 cm厚的木门（ $\epsilon_r=1.35$ ， $\sigma=0.006$  S/m）。模型的三维视图，如图5

(b) 所示。为模拟地下空间环境，在距离该室内模型 2 m 处，使用 30 cm 厚的混凝土 ( $\epsilon_r=6$ ,  $\sigma=0.194 \text{ S/m}$ ) 将其包裹，该模型与混凝土层之间为空气，如图 5 (c) 所示。

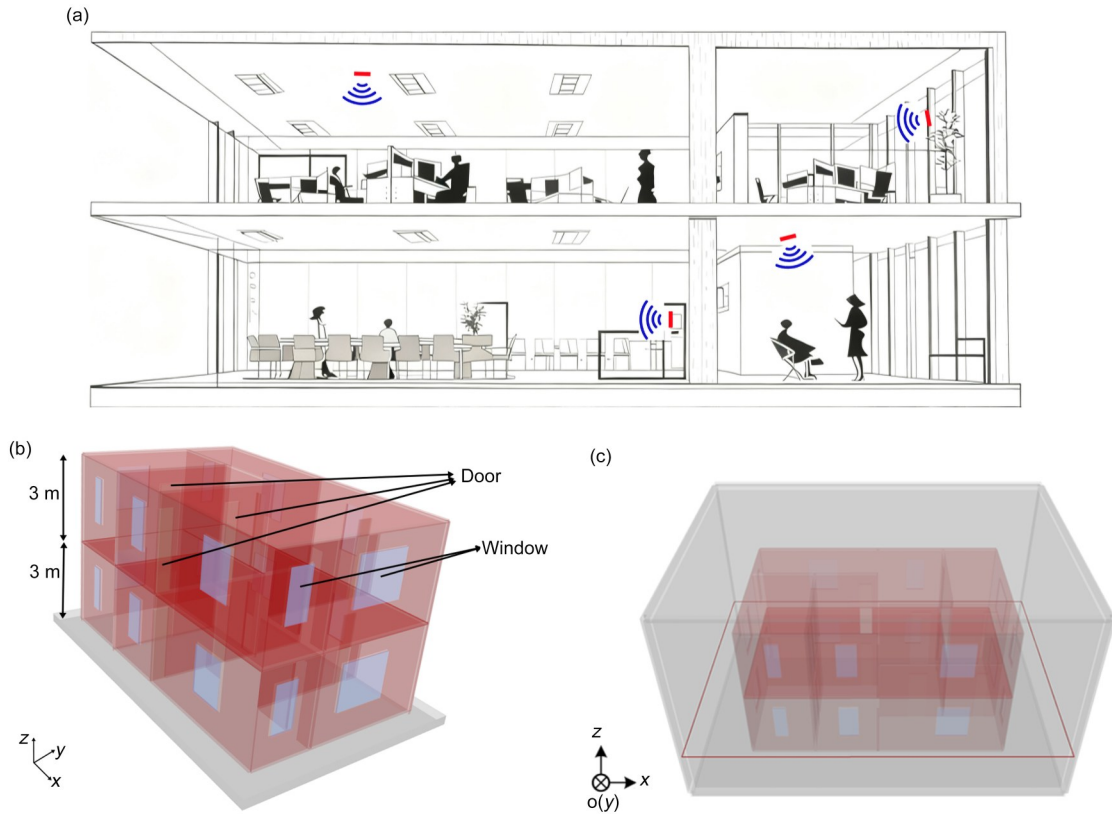


图5 实验场景模型:(a) 室内通信场景示意图;(b) 地上空间结构图;(c) 地下空间结构图

Fig.5 Experimental scenario model: (a) schematic diagram of an indoor communication scenario; (b) above-ground space structure diagram; (c) underground space structure

## 2.2 天线布置与仿真参数设计

为了对比传统室内天线与改进天线对该建筑的信号覆盖性能，将天线放在如图 6 所示的位置。

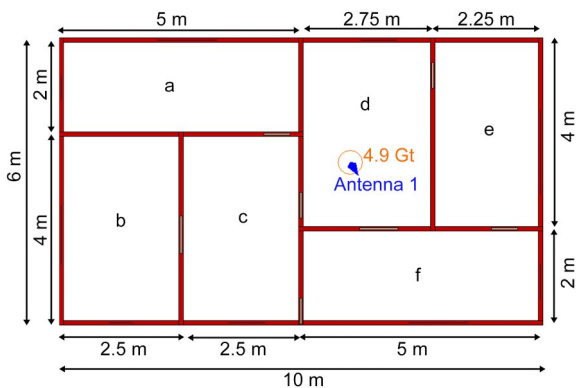


图6 模型平面图  
Fig.6 Model floor plan

该天线位于 d 隔间内，距 d 隔间左侧墙壁 1 m，底面墙 1.5 m，地面高 2.5 m 处。天线的工作频率均为 4.9 GHz，发射功率均为 0.1 W。整栋建筑长

10 m，宽 6 m，高 6 m 每层楼有 6 个隔间，每个隔间依次编号为 a~f。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 一楼空间内电场强度分析

为了评估超表面天线对复杂环境电磁场的覆盖能力，本研究运用射线追踪法，在 4.9 GHz 工作频率下对建筑一楼（高 2 m）的 XOY 截面电场强度分布进行了系统仿真。仿真场景涵盖了地上空间与地下空间两种环境，通过对比传统贴片天线与所设计的超表面天线在上述环境中的电场强度，说明超表面结构在克服地下环境信号衰减及多径效应方面的技术优势。各场景下电场强度分布仿真结果如图 7 所示。

图 7 (a) 表明，传统天线辐射下，地上空间一楼内的电场强度范围为  $1.317 \times 10^{-2} \sim 8.964 \times 10^{-1} \text{ V/m}$ ，信号呈典型的径向衰减分布。与之相

比, 图 7 (b) 表明, 超表面天线辐射下, 地上空间一楼内的电场强度范围为  $3.672 \times 10^{-2} \sim 1.496 \text{ V/m}$ , 其最大值相较于传统天线提升了 67%, 最小值提升 179.1%, 同时, 场内电场强度的波动范围明显缩小, 表明信号分布更加均匀。

图 7 (c) 表明, 传统天线辐射下, 地下空间一楼内的电场强度范围为  $4.503 \times 10^{-3} \sim 8.964 \times 10^{-1} \text{ V/m}$ , 图 7 (d) 表明, 超表面天线辐射下, 地下空间一楼中的电场强度范围为  $5.346 \times 10^{-3} \sim 3.254 \text{ V/m}$ , 相比传统天线最大值提升 263.1%, 最

小值提升 18.7%。从电场分布图可观察到超表面天线在地下环境中基本实现一楼全覆盖, 有效覆盖面积显著提升。

当地上环境转为地下环境时, 天线性能的变化尤为明显。传统天线在一楼的最小电场强度下降了 65.8%, 表现出显著衰减; 而超表面天线的最小电场强度下降了 85.4%, 但其在地下空间中最大电场强度远高于传统天线, 升高了 263.1%, 这表明超表面天线在地下环境时, 仍能维持较高的信号强度与更广的覆盖。

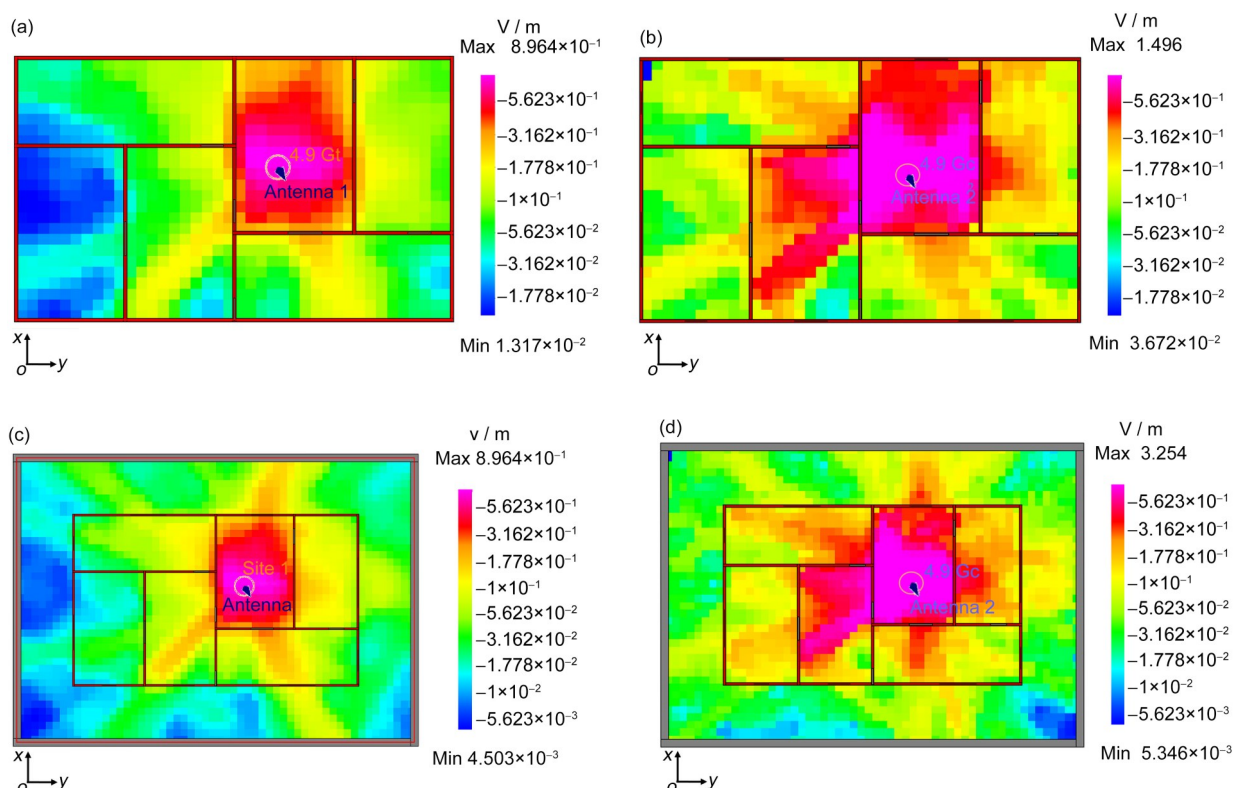


图 7 一楼电场强度分布图: (a) 地上空间传统天线; (b) 地上空间超表面天线; (c) 地下空间传统天线; (d) 地下空间超表面天线 (彩色见网络版)

Fig.7 Electric field intensity distribution map of the first floor: (a) conventional antenna for above-ground space; (b) metasurface antenna for above-ground space; (c) conventional antenna for underground space; (d) metasurface antenna for underground space (color online)

### 3.2 一楼空间内接收功率分析

本研究选取的接收功率评估阈值基于 5G 行业标准与物理层协议:  $-70 \text{ dBm}$  参考了运营商 5G 室内验收标准中的边缘覆盖门限, 可保证复杂地下环境下高速数据业务的连续性;  $-60 \text{ dBm}$  用于表征高品质的室内通信环境; 而  $-35 \text{ dBm}$  的设定则参考了 3GPP TS 38.133 物理层协议。该协议考虑到 5G NR 中波束赋形带来的高功率增益, 将 RSRP 的测

量上限从 LTE 时代的  $-44 \text{ dBm}$  提升至  $-31 \text{ dBm}$ 。选取  $-35 \text{ dBm}$  作为高功率阈值, 可以科学地定量评估超表面天线对电磁波能量的调控与波束聚焦能力。

为了进一步评估超表面天线在提升室内信号接收能力, 本研究运用射线追踪法, 在  $4.9 \text{ GHz}$  工作频率下对建筑一楼 (高  $2 \text{ m}$ ) 空间的接收功率分布进行了系统仿真。仿真实验参考了 5G 行业验收标准与物理层协议, 设定了  $-70 \text{ dBm}$ 、 $-60 \text{ dBm}$  及

-35 dBm 等典型功率门限，量化分析超表面天线在克服复杂地下空间能量损耗、提升高功率覆盖占比方面的技术优势。具体的接收功率分布结果如图 8 所示，通过对比地上与地下环境下天线的近场性能及高功率区域覆盖面积，其详细分析如下。

图 8 (a) 表明，传统天线辐射下，地上空间一楼内的接收功率范围为-68.43~-32.36 dBm，高功率区域主要集中在天线附近，表明信号随距离衰减迅速。图 8 (b) 表明，超表面天线辐射下，地上空间一楼内的接收功率范围为-59.71~-20.12 dBm，其最大接收功率相较于传统天线提升 12.24 dBm，最小功率提升 8.72 dBm。以-35 dBm 为通信阈值时，超表面天线辐射下有 13.12% 的区域高于该门限，而传统天线下仅为 3.85%，超表面天线辐射下大于-35 dBm 的高功率覆盖区域面积增加了 9.27%，超表面天线高功率覆盖区域面积明显扩大，并且在较远的区域也能保持良好的信号强度。

图 8 (c) 表明传统天线辐射下，地下空间一

楼内的接收功率范围为-77.22~-32.38 dBm，图 8 (d) 表明超表面天线辐射下，地下空间一楼内的功率范围为-77.34~-20.76 dBm，相较于传统天线最大接收功率提升 11.62 dBm，最小功率略有降低 (0.12 dBm)，但下降幅度极小。以-35 dBm 为通信阈值时，超表面天线辐射下有 6.52% 的区域高于该门限，而传统天线辐射下仅有 1.65%，超表面天线辐射下大于-35 dBm 的高功率覆盖区域面积增加了 4.87%。这表明在 4.9 GHz 地下环境中，超表面天线具有明显的聚焦效应，近场性能提升显著。

当地上环境转为地下环境时，信号衰减加剧。传统天线的最小接收功率从-68.43 dBm 降至-77.22 dBm，下降了 8.79 dBm；而超表面天线的最小接收功率从-59.71 dBm 降至-77.34 dBm，下降了 17.63 dBm。尽管超表面天线的最小值衰减较快，但其在地下环境中，高于-35 dBm 的信号功率覆盖区域的面积提升了 4.87%，高于传统天线，且整体功率分布更优，这表明了其在抵抗地下空间信号总体衰减方面更具优势。

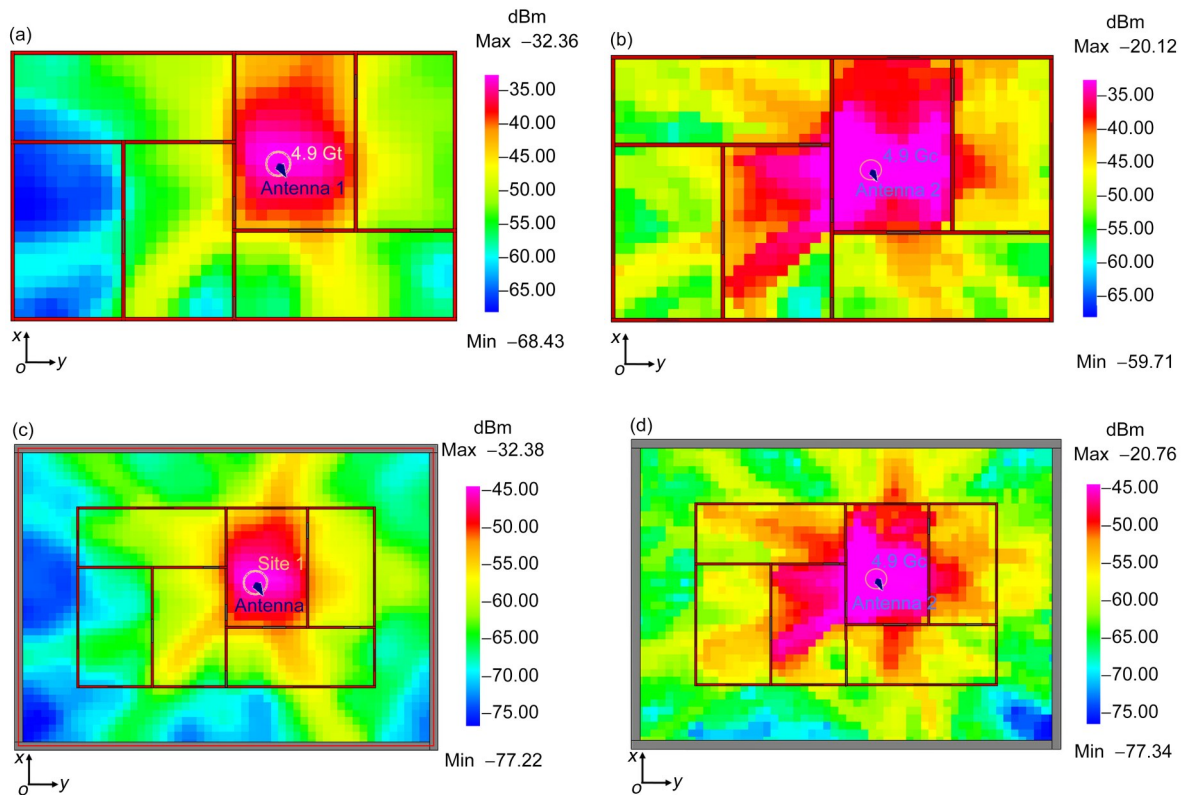


图 8 一楼接收功率分布图:(a) 地上空间传统天线;(b) 地上空间超表面天线;(c) 地下空间传统天线;(d) 地下空间超表面天线 (彩色见网络版)

Fig.8 Received power distribution map of the first floor: (a) conventional antenna for above-ground space; (b) metasurface antenna for above-ground space; (c) conventional antenna for underground space; (d) metasurface antenna for underground space (color online)

### 3.3 二楼电场强度分析

由于实际建筑结构中楼板对电磁波的显著阻挡作用及复杂的多径效应，本研究在4.9 GHz频段下进一步对二楼（高5 m）空间的电场强度分布展开了建模仿真，以分析信号在跨层传播过程中的衰减规律。通过对比传统天线与超表面天线在地上及地下二楼环境中的场强分布特征，验证了超表面结构在克服垂直屏障阻隔及提升室内覆盖均匀性方面的效能。具体的二楼电场强度仿真结果，如图9所示。

图9（a）表明，传统天线辐射下，地上空间二楼内的电场强度范围为 $4.92 \times 10^{-3} \sim 2.14 \times 10^{-1}$  V/m，相比图9（a）中地上空间一楼电场最大值下降76.1%，最小值下降62.6%，反映了楼板的阻挡效应。图9（b）表明，超表面天线辐射下，地上空间二楼内的电场强度范围为 $7.534 \times 10^{-3} \sim 1.776 \times 10^{-1}$  V/m，相比二楼传统天线最小值提升53.2%，

最大值下降16.9%，但整体信号分布更均匀。

图9（c）表明，传统天线辐射下，地下空间二楼内的电场强度范围为 $3.255 \times 10^{-4} \sim 2.143 \times 10^{-1}$  V/m，图9（d）表明，超表面天线辐射下，地下空间二楼内的电场强度范围为 $3.048 \times 10^{-4} \sim 1.477 \times 10^{-1}$  V/m，相比传统天线最大值和最小值都有所下降，最大值下降31.0%，最小值下降6.3%。但是，从电场分布图中可观察到超表面天线在地下环境中基本实现二楼全覆盖，且整体覆盖更为均匀。

对比结果发现，相较于地上环境，在地下空间中，传统天线在二楼的最大电场强度从 $2.14 \times 10^{-1}$  V/m变为 $2.143 \times 10^{-1}$  V/m，几乎无变化；而超表面天线则从 $1.776 \times 10^{-1}$  V/m降至 $1.477 \times 10^{-1}$  V/m，下降16.9%。尽管电场最大值减小，但超表面天线在地下环境中基本实现二楼全覆盖，且整体覆盖更为均匀，体现出超表面结构在复杂环境中具有更优的覆盖性。

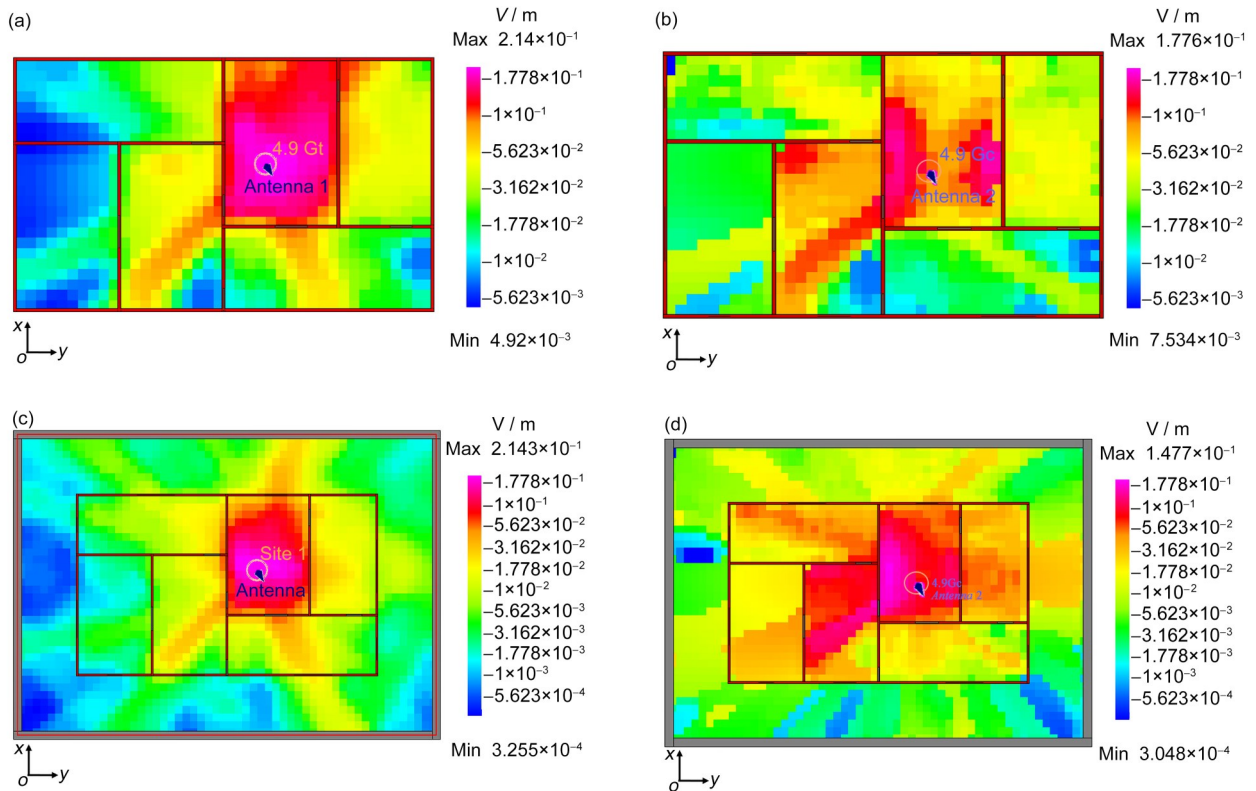


图9 二楼电场强度分布图:(a) 地上空间传统天线;(b) 地上空间超表面天线;(c) 地下空间传统天线;(d) 地下空间超表面天线(彩色见网络版)

Fig.9 Electric field intensity distribution map of the second floor: (a) conventional antenna for above-ground space; (b) metasurface antenna for above-ground space; (c) conventional antenna for underground space; (d) metasurface antenna for underground space (color online)

### 3.4 二楼接收功率分析

运用射线追踪法进一步对4.9 GHz工作频率下，二楼（高5 m）空间的接收功率分布进行了仿真分析。通过定量对比两种天线在地上与地下二楼边缘区域的信号强度表现，重点评估了超表面结构对抑制信号衰减盲区，及增强通信链路稳定性的能力。同时，利用特定通信阈值下的覆盖率占比，验证了超表面天线系统在复杂受限空间中优化能量分布的能力。二楼接收功率分布结果如图10所示。

图10中的(a)表明，传统天线辐射下，地上空间二楼内的接收功率范围为-76.66~-44.52 dBm。图10中的(b)表明，超表面天线辐射下，地上空间二楼内的接收功率范围为-74.57~-46.01 dBm。与传统天线相比，超表面天线的最小接收功率提高了2.09 dBm，这有效提升了弱信号区的覆盖水

平；其最大接收功率虽略有降低，但仅下降1.49 dBm。这表明在4.9 GHz频率下，该超表面天线能有效改善二楼边缘区域的信号覆盖。

图10中的(c)表明，传统天线辐射下，地下空间二楼内的接收功率范围为-99.25~-44.51 dBm。图10(d)表明，超表面天线辐射下，地下空间二楼中的接收功率范围为-101.32~-44.62 dBm。相比传统天线，超表面天线的最大与最小接收功率均略有下降，但其空间分布的均匀性提高。

在地上二楼环境中，以-60 dBm为通信阈值时，超表面天线辐射下有52.50%的区域高于该门限，而传统天线下仅为49.69%，相对提升5.66%。在地下二楼环境中以-70 dBm为通信阈值时，超表面天线辐射下有53.12%的区域强于该值，优于传统天线的48.62%，相对提升9.25%。在更严格的-65 dBm阈值下，超表面天线仍保持38.53%的较高功率区域占比，明显高于传统天线的34.53%。

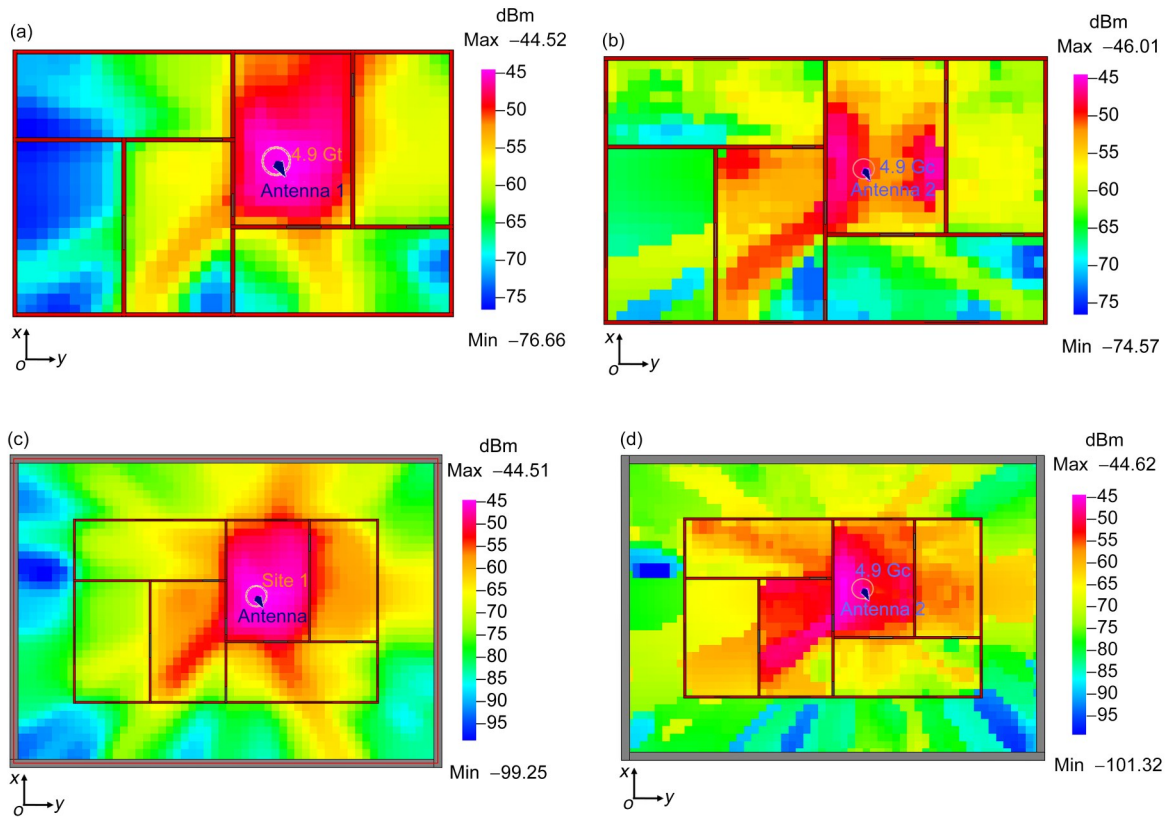


图10 二楼接收功率分布图:(a) 地上空间传统天线;(b) 地上空间超表面天线;(c) 地下空间传统天线;(d) 地下空间超表面天线(彩色见网络版)

Fig.10 Received power distribution map of the second floor: (a) conventional antenna for above-ground space; (b) metasurface antenna for above-ground space; (c) conventional antenna for underground space; (d) metasurface antenna for underground space (color online)

对比图 8 和图 10 的接收功率分布情况可知,传统天线辐射下存在的大范围深蓝色弱信号区(如低于 $-90$  dBm)而超表面天线辐射下蓝色区域明显减少,同时高接收功率的黄色与绿色区域显著扩大。这表明超表面天线通过其特有的波束调控机制,实现了电磁能量的空间优化分布,虽在局部极值上略有下降,但在系统层面显著增强了整体覆盖的一致性与通信链路的可靠性。

### 3.5 超表面天线辐射下地下空间电磁环境安全性分析

地下空间内的电磁环境直接影响无线通信系统的可靠性、电子信号设备的安全性以及供电系统的稳定运行,需对地下空间的电磁环境安全进行分析。将传统天线和超表面天线工作在 $4.9$  GHz

频率下的电场强度仿真值,分别与国家标准《电磁环境控制限值》(GB 8702—2014)<sup>[19]</sup>和 ICNIRP 参考限值<sup>[20]</sup>进行对比,以评估地下空间内的电磁环境安全性。对比结果如表 2 所示。

由表 2 对比得出,超表面天线与传统天线在 $4.9$  GHz 的工作频率下,传统天线在所有位置中的最大电场强度( $0.896 4$  V/m,地上一楼与地下一楼)分别为国家标准与 ICNIRP 公众暴露限值的 $5.82\%$ 与 $1.47\%$ ;超表面天线在所有位置中的最大电场强度 $3.254$  V/m,分别为国家标准与 ICNIRP 公众暴露限值的 $21.13\%$ 与 $5.33\%$ 。这一对比充分表明,尽管超表面天线显著提升了信号强度,但其辐射场强在所有测试场景下均处于安全范围内,符合国家及国际电磁环境安全要求。

表 2 电场强度最大值与国标/ICNIRP 限值对比  
Table 2 Comparison of the maximum electric field strength with national and ICNIRP exposure limits

位置 Location	电场强度/( $V \cdot m^{-1}$ ) Electric field strength			
	传统天线 Conventional antenna	超表面天线 Metasurface antenna	国标限值 National standard limit	ICNIRP 限值 ICNIRP limit
地上一楼 First Floor, above-ground	0.896 4	1.496 0	15.40	61.00
地上二楼 Second floor, above-ground	0.214 0	0.177 6	15.40	61.00
地下一楼 First floor, underground	0.896 4	3.254 0	15.40	61.00
地下二楼 Second floor, underground	0.214 3	0.147 7	15.40	61.00

### 3.6 超表面天线辐射下人体电磁暴露安全评估

由于地下空间内电磁环境更为复杂,超表面天线虽然可以提升其通信质量,但对人体的电磁辐射影响是学界和公众更为关心的问题,本研究进一步评估了超表面天线辐射下,人体电磁暴露安全性。

#### 3.6.1 人体电磁模型

为仿真分析人体组织吸收电磁辐射剂量的水平,本研究利用 ANSYS HFSS 构建标准成年男性人体模型(如图 11 所示),根据经典的 4 阶 Cole-Cole 模型<sup>[21]</sup>计算得出,在 $4.90$  GHz 频点,人体组织的相对介电常数 $\epsilon_r=37.43$ ,电导率 $\sigma=3.28$  S/m,密度 $\rho=1297$  kg/m<sup>3</sup>。

#### 3.6.2 人体组织吸收的电磁辐射剂量分析

为量化评估超表面天线人体的最大辐射影响,本研究选取场强最高的地下一楼(电场峰值

$3.254$  V/m)作为评估环境。在 $4.9$  GHz 频点下,仿真计算了人体组织在该环境中吸收的最大电磁辐射剂量,人体 $10$  g 平均 SAR 空间分布结果如图 12 所示。

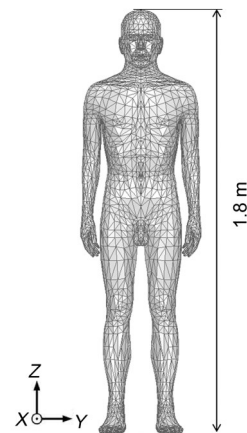


图 11 人体模型  
Fig. 11 Human body model

由图 12 可知，人体吸收的电磁能量主要集中在头部朝向天线辐射主瓣的一侧。地下环境由于被 30 cm 厚混凝土墙体包裹，封闭空间内的电磁反射与多径干涉现象加剧，无论是传统天线辐射还是超表面天线辐射下，人体组织吸收的 SAR 均高于处于地上开放空间。由于超表面天线的辐射能量更大且更为集中，人体组织吸收的 SAR 比传统天线高，但人体全身 SAR 分布区域明显小于传统天线。

将各场景下的 SAR 仿真最大值与 ICNIRP 中公

众暴露基本限值 (2.0 W/kg) 进行对比，结果如表 3 所示。在地上环境中，超表面天线辐射下的人体最大 SAR 值  $9.828 \times 10^{-7}$  W/kg 高于传统天线的  $7.092 \times 10^{-7}$  W/kg；地下空间中，超表面天线辐射下人体 SAR 最大值提升至  $4.433 \times 10^{-6}$  W/kg，仍然低于 ICNIRP 国际标准及国标限值 (2.0 W/kg)。上述结果表明，超表面天线不仅能够提高地下通信质量，也能保证其辐射环境中，人体电磁暴露的安全性。

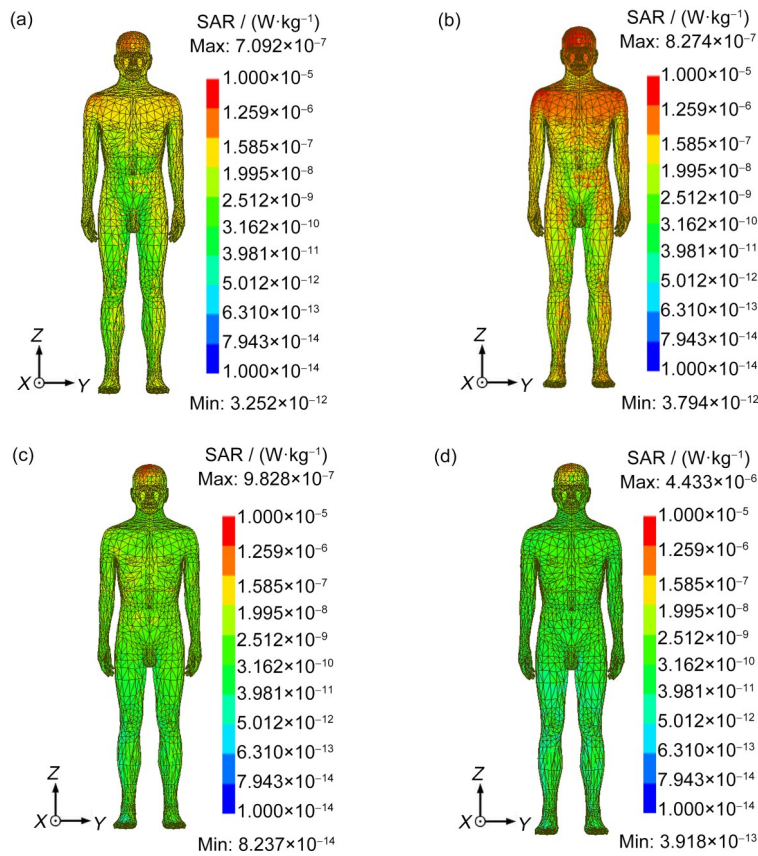


图 12 不同场景下人体 SAR 值分布对比：(a) 地上空间传统天线；(b) 地下空间传统天线；(c) 地上空间超表面天线；(d) 地下空间超表面天线(彩色见网络版)

Fig.12 Comparison of SAR distribution in the human torso under different scenarios: (a) conventional antenna for above-ground space; (b) conventional antenna for underground space; (c) metasurface antenna for above-ground space; (d) metasurface antenna for underground space

表3 4.9 GHz 频率下人体 SAR 最大值与 ICNIRP 限值的对比

Table 3 Comparison between maximum SAR values in the human body and ICNIRP limits at 4.9 GHz

天线类型	仿真场景	SAR 最大值/(W·kg <sup>-1</sup> )	ICNIRP 限值/(W·kg <sup>-1</sup> )	限值/仿真值
Antenna type	Simulation scenario	Maximum SAR	ICNIRP limit	Ratio (Limit/Simulation)
传统天线	地上一楼	$7.092 \times 10^{-7}$	2.0	$2.820 \times 10^6$
Conventional antenna	First floor, above-ground			
传统天线	地下一楼	$8.274 \times 10^{-7}$	2.0	$2.417 \times 10^6$
Conventional antenna	First floor, underground			

续表

天线类型	仿真场景	SAR 最大值/(W·kg <sup>-1</sup> )	ICNIRP 限值/(W·kg <sup>-1</sup> )	限值/仿真值
Antenna type	Simulation scenario	Maximum SAR	ICNIRP limit	Ratio (Limit/Simulation)
超表面天线	地上一楼	9.828×10 <sup>-7</sup>	2.0	2.035×10 <sup>6</sup>
Metasurface antenna	First floor, above-ground			
超表面天线	地下一楼	4.433×10 <sup>-6</sup>	2.0	4.512×10 <sup>5</sup>
Metasurface antenna	First floor, underground			

## 4 结论

通过对比传统天线和本论文提出的超表面天线工作在4.9 GHz时，地上和地下空间中，一楼和二楼电磁环境的场强和接收功率分布情况，得出以下结论：（1）超表面天线的辐射性能和信号覆盖性能更好。在地上环境的通信覆盖中，超表面天线电场强度最大值提升67%，最小值提升179.1%，接收功率最大值提升12.24 dBm，最小值提升8.72 dBm，且信号分布更加均匀，动态范围明显缩小。（2）超表面天线地下环境适应性强。在地下空间环境中，相较于传统天线，超表面天线在近场区域的性能提升和覆盖均匀性方面明显优于传统天线。且能有效提升二楼的有效信号覆盖率，这表明该天线设计具有显著的近场聚焦效应。（3）超表面天线辐射下的地下电磁环境是安全的。最大电场强度仅为国标限值的21.13%与ICNIRP限值的5.33%；并且，人体组织暴露在该环境中的最大10 g平均SAR仅为4.433×10<sup>-6</sup> W/kg，远低于ICNIRP国际公众暴露限值。综上所述，超表面天线相较于传统天线在封闭室内环境具有更好的信号覆盖性能，且其辐射下的电磁环境及人体电磁暴露是安全的。该设计为解决地下空间信号覆盖难题提供了有效的技术方案。未来工作会进一步优化超表面结构，以增强其对楼板等障碍物的穿透能力。

**作者贡献声明** 李欣鸿实施场景建模与计算、数据处理及论文的撰写等工作；周文颖整体设计论文的框架、明确研究方法，实施具体研究步骤、审定论文的结果与结论，并进行撰写及校对；王盼盼实施天线建模与计算、数据处理及论文的撰写等工作；逯迈审定论文的结果与结论以及论文整体修改；马踊负责天线设计、数据处理与分析。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

## 参考文献

- Li Y N, Yu B G, Huang L. Path loss modeling of wireless signals in underground tunnels[J]. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, 2025, 6(1): 64-74. DOI: 10.1109/OJAP.2024.3467058.
- Zhou C M, Damiano N. Electromagnetic environments and wireless channels for through-the-earth (tte) communications in an underground coal mine: modeling and measurements[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2021, 103: 91-101. DOI: 10.2528/pierm21041602.
- 杨杰, 李跃波, 熊久良, 等. 城市地下空间电磁脉冲防护研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 61-67. YANG Jie, LI Yuebo, XIONG Jiuliang, et al. Research on the protection of urban underground space from electromagnetic pulse[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 61-67.
- 杨天福, 李荣跃, 梁乐波, 等. 电磁环境影响分析及标准测试和设计[J]. 机电工程技术, 2024, 53(5): 307-310. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.05.069. YANG Tianfu, LI Rongyue, LIANG Lebo, et al. Electromagnetic environmental impact analysis and standard testing and design[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(5): 307-310. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.05.069.
- 周文颖, 赵吉庆. 地铁隧道内民用通信漏泄同轴电缆的电磁环境预测及其安全风险分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, 42(4): 040602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0010. ZHOU Wenying, ZHAO Jiqing. Electromagnetic environment prediction and safety risk analysis of civil communication leakage coaxial cables in subway tunnels [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, 42(4): 040602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0010.

- 6 杜玥, 逯迈, 谢圭煜. 毫米波5G天线阵列电磁暴露剂量学分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.  
DU Yue, LU Mai, XIE Guiyu. Dosimetric analysis of electromagnetic exposure by millimeter-wave 5G antenna arrays[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(6): 060501. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0040.
- 7 周文颖, 许进京, 逯迈, 等. 小型化轨旁双频天线设计及其电磁兼容性[J]. 西南交通大学学报, 2025, **60**(2): 462-471. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20240220.  
ZHOU Wenying, XU Jinjing, LU Mai, *et al.* Miniaturized dual-band trackside antenna design and its electromagnetic compatibility study[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, **60**(2): 462-471. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20240220.
- 8 Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. Nature Photonics, 2014, **8** (12): 889-898. DOI: 10.1038/nphoton.2014.247.
- 9 Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. Nature Materials, 2014, **13**(2): 139-150. DOI: 10.1038/nmat3839.
- 10 Hsiao H H, Chu C H, Tsai D P. Fundamentals and applications of metasurfaces[J]. Small Methods, 2017, **1** (4): 1600064. DOI: 10.1002/smt.201600064.
- 11 Chen H T, Taylor A J, Yu N F. A review of metasurfaces: physics and applications[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, **79**(7): 076401. DOI: 10.1088/0034-4885/79/7/076401.
- 12 张茜. 基于超表面的电磁波调控与应用[D]. 南京: 东南大学, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004127.  
ZHANG Xi. Electromagnetic wave manipulation and application based on metasurfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2019.004127.
- 13 尹佳媛. 新型人工电磁表面电磁调控关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.  
YIN Jiayuan. Research on key technologies of electromagnetic manipulation for novel artificial electromagnetic surfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- 14 张朋, 王佳维, 曾哲昊. 6G智能超表面技术发展及应用分析[J]. 信息通信技术, 2023, **17**(6): 63-71.  
ZHANG Peng, WANG Jiawei, ZENG Zhehao. Development and application analysis of 6G reconfigurable intelligent surface technology[J]. Information and Communications Technologies, 2023, **17** (6): 63-71.
- 15 刘显荻, 张鹏, 张莉萍, 等. 可重构智能表面技术及应用探讨[J]. 邮电设计技术, 2025(6): 45-51. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.009.  
LIU Xiandi, ZHANG Peng, ZHANG Liping, *et al.* Exploration of reconfigurable intelligent surface technology and its application[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2025(6): 45-51. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.009.
- 16 方祖琦, 程强, 崔铁军. 基于时域数字编码超材料的非线性准贝塞尔波束生成[J]. 雷达学报, 2021, **10**(2): 267-273.  
FANG Zuqi, CHENG Qiang, CUI Tiejun. Nonlinear quasi-Bessel beam generation based on the time-domain digital-coding metasurface[J]. Journal of Radars, 2021, **10** (2): 267-273.
- 17 Varshney P, Singh R P, Jain R K. Performance analysis of millimeter-wave propagation characteristics for various channel models in the indoor environment[J]. International Journal of Experimental Research and Review, 2024, **44**: 102-114. DOI: 10.52756/ijerr.2024.v44spl.009.
- 18 Rostamikafaki Z, Chan F, D'Amours C. 5G new radio signal propagation and ground-to-air channel modeling at 3.565 GHz based on extensive measurements[J]. IEEE Access, 2024, **12**: 143975-143984. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3469050.
- 19 生态环境部. 电磁环境控制限值: GB 8702—2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.  
Ministry of Ecology and Environment. Limits for electromagnetic environment control: GB 8702—2014 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- 20 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz) [J]. Health Physics, 2020, **118**(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- 21 李致远, 逯迈. 5G基站天线的人体电磁剂量学研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0015.  
LI Zhiyuan, LU Mai. Electromagnetic dosimetry research on the human body for 5G base station antennas[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(4): 040601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0015.