

文章编号: 1671-251X(2025)02-0041-08

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2024110082](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2024110082)

# 矿井巷道无线传输超表面反射测试分析

李昀<sup>1,2</sup>, 罗伟<sup>3</sup>, 尹波<sup>3</sup>, 李小亮<sup>3</sup>

(1. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039;  
3. 重庆邮电大学 光电工程学院, 重庆 400065)

**摘要:** 高频无线电磁波在弯曲巷道、巷道拐角处传输损耗大, 造成信号盲区。针对该问题, 提出采用超表面反射技术进行无线信号覆盖补盲。改进超表面阵列单元传统的十字结构, 通过嵌入多级嵌套的矩形振子和改变内部十字尺寸, 获得了  $330^\circ$  相移范围和良好的线性相移曲线, 并基于改进的十字结构设计制作了超表面反射装置。选择 5.8 GHz 超高频频段, 针对清水溪巷道起坡段弯曲巷道和主辅段岔口, 仿真并现场测试了超表面反射装置的信号增强效果。结果表明, 在入射距离与接收距离固定、发射天线结构不同的情况下, 无论是在起坡段弯曲巷道还是主辅段岔口位置, 安装超表面反射装置后无线信号的信噪比、参考信号接收功率均得到不同程度的增强, 采用线极化喇叭状定向天线时信号增强效果最优, 实测参考信号接收功率增益最大值为 13 dB。分析指出矿井巷道中应用超表面无源反射技术存在入射波角度难对准、波束难集中、入射距离短等问题, 结合测试结果推断矿井巷道岔口处适合固定安装超表面反射装置用于点对点传输补盲。

**关键词:** 矿井无线传输; 巷道信号覆盖补盲; 无线信号增强; 超表面反射; 超表面阵列设计

中图分类号: TD655

文献标志码: A

Analysis of metasurface reflection tests for wireless transmission in mine roadways

LI Yun<sup>1,2</sup>, LUO Wei<sup>3</sup>, YIN Bo<sup>3</sup>, LI Xiaoliang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China;  
2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China; 3. College of Optoelectronic Engineering,  
Chongqing University, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** High-frequency wireless electromagnetic waves suffer significant transmission loss in curved roadways and at roadway corners, resulting in signal blind spots. To address this issue, a metasurface reflection technique was proposed to enhance wireless signal coverage and mitigate signal blind spots. The traditional cross-shaped structure of the metasurface array unit was improved, and a  $330^\circ$  phase shift range and a well-defined linear phase shift curve were achieved by embedding multi-level nested rectangular resonators and adjusting the internal cross dimensions. Based on this, a metasurface reflection device was designed and fabricated. Using the 5.8 GHz ultra-high frequency band, simulations and field tests were conducted to evaluate the signal enhancement performance of the metasurface reflection device in the inclined curved section and the intersection of main and auxiliary sections in the Qingshuixi roadway. The results showed that, with fixed transmission and reception distances and different transmission antenna structures, the installation of the metasurface reflection device enhanced both the signal-to-noise ratio and the reference signal receiving power to varying degrees in both the inclined curved section of roadways and the intersection of main and auxiliary sections. The enhancement was most significant when using a linearly polarized horn directional antenna, with a maximum gain of 13 dB in

收稿日期: 2024-11-27; 修回日期: 2025-02-10; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4703603); 煤矿灾害防控全国重点实验室 2022 年开放基金项目(2022SKLKF12)。

作者简介: 李昀(1986—), 男, 重庆人, 助理研究员, 硕士, 主要从事矿井无线自组网技术研究工作, E-mail: [55703833@qq.com](mailto:55703833@qq.com)。

引用格式: 李昀, 罗伟, 尹波, 等. 矿井巷道无线传输超表面反射测试分析[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 41-47, 56.

LI Yun, LUO Wei, YIN Bo, et al. Analysis of metasurface reflection tests for wireless transmission in mine roadways[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 41-47, 56.



扫码移动阅读

received reference signal power. The analysis highlighted challenges in applying passive metasurface reflection technology in mine roadways, including difficulties in aligning the incident wave angle, focusing the beam, and achieving sufficient wave incidence distance. Based on the test results, fixed installation of metasurface reflection devices at roadway intersections is recommended for point-to-point transmission blind spot mitigation.

**Key words:** mine wireless transmission; roadway signal coverage enhancement and blind spot mitigation; wireless signal enhancement; metasurface reflection; metasurface array design

## 0 引言

矿井无线通信与矿用 5G 移动通信技术是煤矿智能化的关键支撑技术之一, 井下无线通信网络是智慧矿山建设的重要和关键基础设施, 广泛应用于各生产场景<sup>[1-2]</sup>。高频无线电更易承载大带宽传输, 应用范围更广, 但频率越高, 传播路径损耗越大。孙继平等<sup>[3]</sup>在三道沟煤矿辅助运输大巷和综采工作面分别进行了 700 MHz~6 GHz 频段无线传输测试, 并对测试结果进行了分析, 得到了不同频率无线传输平均衰减曲线, 得出随着频率升高, 平均衰减基本逐步升高, 5 400, 6 000 MHz 的无线传输平均衰减明显大于 2 400, 1 500 MHz。矿井无线传输受工作频率、导体, 以及巷道截面、转弯、分支、倾斜等影响, 如巷道转弯会增大无线传输衰减, 转弯越急, 衰减越大, 且工作频率越高, 巷道转弯造成的衰减越大<sup>[4-5]</sup>。李大伟<sup>[6]</sup>实测了 16 m×8 m(宽×高)大断面拱形弯曲隧道中 5.8 GHz 工作频率下的电磁波接收功率, 结果表明弯曲段的路径损耗指数为直隧道的 10 余倍。

高频无线电在弯曲巷道、巷道拐角处传输损耗特别大, 必然造成信号盲区, 需进行无线信号覆盖补盲。超表面反射技术具备调控无线信道的能力, 被证实可用于非视距场景的信号延伸、信号增强, 实现无线通信系统中继补盲。L. Talbi 等<sup>[7]</sup>研究了微波散射体在非视距状态下的潜在用途, 发现在 29~30 GHz 频段内正确设计的微波散射体能有效扩展毫米波在室内走廊的通信距离, 为超表面微观电场调控反射提供了可行性参考。B. Kim 等<sup>[8]</sup>研究了室内与室外 28 GHz 电磁波传播特性, 发现非视距区域添加基于超表面制作的无源中继后, 信号接收功率可增加约 10 dBm。D. Ha 等<sup>[9]</sup>针对 5G 毫米波通信的室内与室外链路损耗过高问题, 提出在窗户位置安装基于超表面制作的无源中继以降低链路损耗, 实测发现在忽略窗户和极化影响条件下可将链路损耗降低 40 dB。刘海霞等<sup>[10]</sup>针对毫米波通信设计了双层十字交叉振子无源智能反射面(Reconfigurable Intelligence Surface, RIS), 应用到室内典型的 L 形走廊场景, 验证了无源可重构 RIS 对室内无线信号覆盖的增强效果。费丹等<sup>[11]</sup>在室内楼道测试了不同入

射角度、不同接收距离条件下无 RIS、随机码本 RIS、赋形码本 RIS 的对比实验, 显示基于 RIS 调制的无线网络能够提升下行吞吐量约 10 dB, 同时提出了室内条件不能保证发射机从足够远的距离把入射波束打在所有阵列单元上的问题。

针对现有无线通信技术在井下非视距场景中的无线盲区覆盖问题, 李世银等<sup>[12-13]</sup>认为 RIS 具有无源、低功耗和易部署等特点, 适用于煤矿井下场景, 因此提出在井下无线通信系统中引入 RIS 技术, 实现无线信号覆盖补盲。目前矿山学界缺乏对矿井巷道环境中超表面反射补盲和信号增强的研究。本文从仿真和实测角度分析矿井巷道安装超表面反射装置后的无线信号增强效果, 为研究矿井超表面反射信道仿真、波束成形和装置部署规划等提供应用基础。

## 1 测试条件

### 1.1 测试场地

选择在煤矿灾害防控全国重点实验室的瓦斯爆炸实验巷道——清水溪巷道的起坡段弯曲巷道和主辅段岔口这 2 个电磁波传播衰减剧烈位置测试超表面反射补盲和信号增强效果。清水溪巷道结构如图 1 所示。巷道总长 896 m, 主要为上半圆拱形断面, 尺寸为 3.2 m×2.6 m(宽×高), 截面积为 7.2 m<sup>2</sup>。主巷包括 451 m 平巷和倾角约为 23°、长约 260 m 的垂向斜巷, 以及连接平巷和斜巷的 60 m 起坡段弯曲巷道, 其余 186 m 为辅助巷道(副巷)。

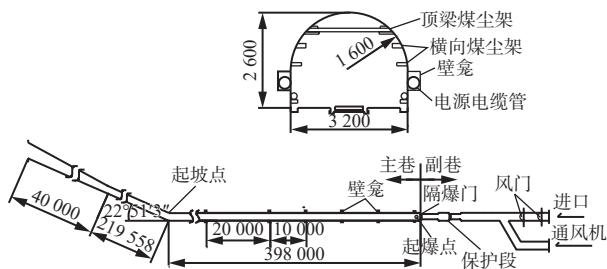


图 1 清水溪巷道结构

Fig. 1 Qingshuixi roadway structure

起坡段弯曲巷道中存在约 15 m 长的完全盲区, 如图 2 所示。该盲区内无法直视巷口和坡顶。

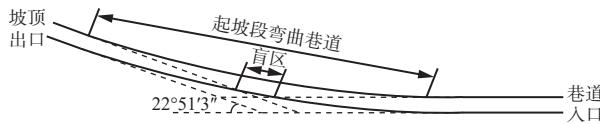


图 2 清水溪巷道起坡段弯曲巷道

Fig. 2 Inclined curved roadway in Qingshuixi roadway

主平巷与辅助巷道处于同一水平面,两巷中线夹角约为47°,连接处有1个岔口(主辅段岔口),如图3所示。

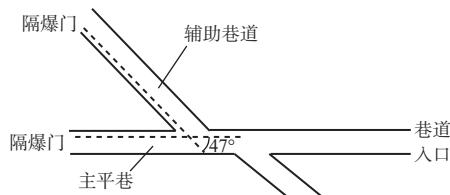


Fig. 3 Intersection of main and auxiliary sections in Qingshuixi roadway

## 1.2 测试设备

选择复杂巷道电磁波传播易衰落频段5.8 GHz进行测试。使用1对发射机和接收机,发射机能更换天线,以便测试不同极化天线的反射效果。为使测试更接近真实矿井应用状态,采用KTZ12.6W矿用本安型无线中继器(安全标志编号为MFD240244)作为接收机,如图4(a)所示。采用KTZ12.6W矿用本安型无线中继器原理性样机作为发射机,如图4(b)所示。KTZ12.6W矿用本安型无线中继器可实现点对点无线组网,采用时分双工工作方式,发射功率为23 dBm,频段范围为5 150~5 850 MHz,接收灵敏度为-109 dBm(20 MHz带宽),调制方式为16QAM,额定工作电压为12.6 V,最大峰值电流为1 000 mA;收发模式为双天线1TR1R,发射机的1TR天线接口为N型母头射频连接器,可现场更换天线,接收机不可更换天线。测试时使用3种天线:天线A为线极化鞭状全向天线,增益为7.0 dBi;天线B为线极化喇叭状定向天线,增益为10.5 dBi;天线C为圆极化螺旋状定向天线,增益为9.0 dBi。发射机的1TR接口可更换这3种天线,1R接口固定使用天线A;接收机2个天线接口均固定使用天线A。接收机屏幕可以直接显示信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)、参考信号接收功率(Reference Signal Receiving Power, RSRP),便于读取数据。

## 2 超表面反射装置设计

反射型超表面装置的典型结构通常包括3个子层和1个控制器<sup>[14]</sup>,外层大量金属贴片印在金属衬底上形成阵列,直接与入射波束作用。超表面阵列

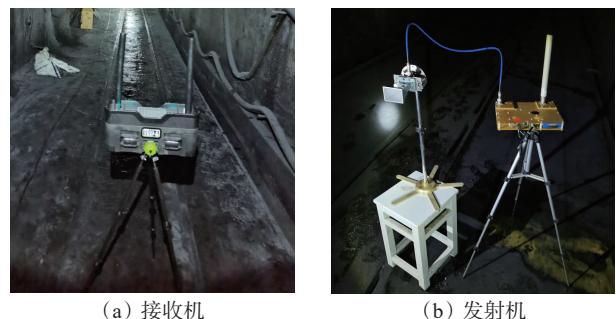


图 4 测试设备

Fig. 4 The testing devices

通过各个单元补偿相位形成预定主波束,从而实现无源反射。为实现实时的波束调控,S. V. Hum等<sup>[15]</sup>提出一种基于变容二极管谐振元件的电子可调谐反射阵列,设计了7×10的可调阵列,在5.8 GHz频段可实现325°的相位变化,通过仿真和实测验证了这种可调谐阵列的波束扫描能力;M. Riel等<sup>[16]</sup>提出一种基于孔径耦合的电子波束扫描阵列,设计了6×5的可重构反射阵列,在5.4 GHz频率下波束扫描范围可达40°;T. Makdissi等<sup>[17]</sup>提出一种双线性偏振移相单元,在5.24~5.80 GHz频带内相对带宽为10%,且相位误差小于31°。

典型超表面反射装置设计时需要准确的馈源位置和入射角度计算反射电场,但巷道环境无法保障电磁波入射超表面阵列的角度。传统超表面阵列单元在不同的波束入射角度下,单元反射相位变化差异明显。为了增强超表面阵列单元的角度不敏感性,在传统十字结构单元中嵌入多级嵌套的矩形振子,并改变单元内部十字尺寸和横向矩形谐振贴片尺寸,实现330°相移范围,获得良好的线性相移曲线。基于改进十字结构设计的超表面阵列单元如图5所示。 $L_x$ , $L_y$ 分别为十字结构单元的横向臂和纵向臂长度; $w$ 为矩形振子宽度, $w=0.5$  mm; $L_{x1}$ , $L_{y1}$ 分别为横向振子和纵向振子长度, $L_{x1}=L_{y1}=5.2$  mm; $W$ 为矩形谐振贴片宽度, $W=0.5$  mm; $g$ 为矩形振子与谐振贴片间隙宽度, $g=0.6$  mm; $P$ 为十字结构单元周期, $P=17$  mm。阵列单元印刷在相对介电常数为2.2、介电损耗角正切值为0.007的接地基板F4B上,介质板厚度 $h=3$  mm。在入射角度 $\theta$ 为0~60°情况下,超表面阵列单元反射相位变化范围保持在60°以内,且反射相位曲线具有平行性。反射相位曲线随单元贴片长度变化的线性度良好,且相位变化范围大于330°,如图6所示。

基于改进十字结构设计并加工60 cm×60 cm(长×宽)的超表面反射板,每块反射板具有32×32个阵列单元,如图7所示。

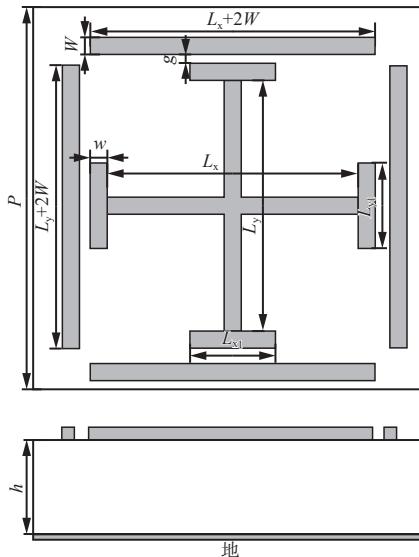


图 5 改进十字结构的超表面阵列单元

Fig. 5 Metasurface array unit with improved cross structure

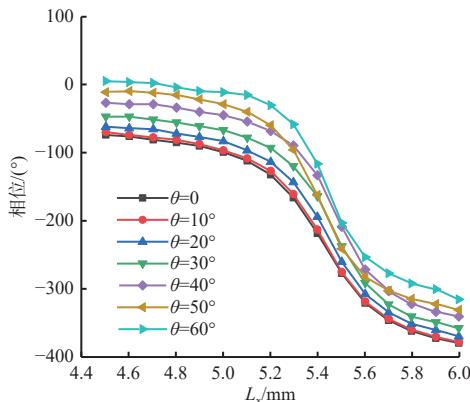


图 6 超表面阵列单元反射相位

Fig. 6 Reflection phase of metasurface array unit

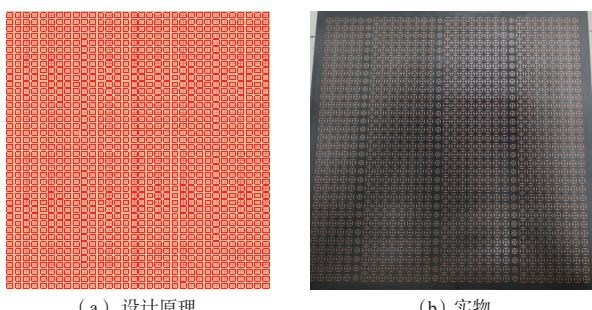


图 7 超表面反射板

Fig. 7 Metasurface reflector

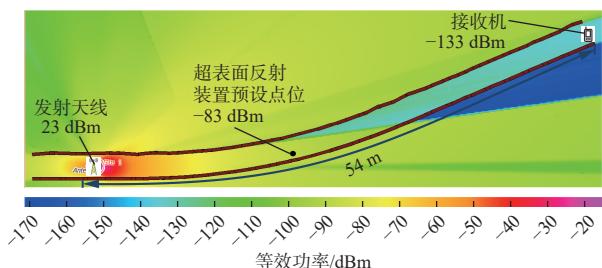
### 3 巷道信号覆盖仿真

#### 3.1 起坡段弯曲巷道仿真

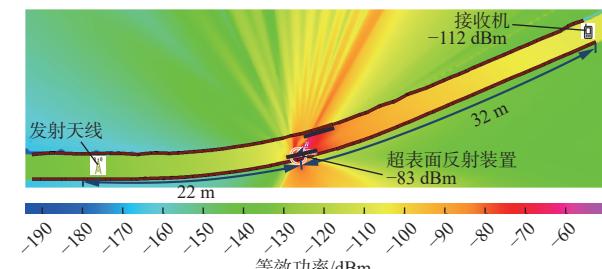
采用射线追踪模型<sup>[18]</sup>进行确定性建模。首先根据巷道环境特点,运用几何光学理论将天线、超表面反射装置作为辐射源,将天线发出的信号、超表面反射装置的反射信号等效为射线;然后对每条射线进行路径跟踪,在遇到巷道壁、超表面反射装置等散射

体时,按反射的物理机制计算电磁场;最后在接收点处将到达的各射线综合,定量计算信号到达接收点的幅度、时延及瞬时相位,从而实现精准的传播预测<sup>[19]</sup>。

起坡段弯曲巷道内信号覆盖主要由墙体反射及直射组成,采用等效辐射源方法,参照有源基站场景,构建断面尺寸为 3.2 m×2.6 m(宽×高)、弯曲夹角为 23°的矩形巷道模型。设置巷道壁为混凝土材质,反射损耗为 9 dB,透射损耗为 40 dB;模拟射线追踪次数为 3,发射天线设置参照天线 B,发射功率为 23 dBm,辐射点设置于断面中心指向起坡段弯曲巷道且射线与断面法线重合;发射天线与超表面反射装置相距 22 m,发射天线距接收机 54 m。仿真得到起坡段弯曲巷道内安装超表面反射装置前后的无线信号功率分布,如图 8 所示。其显示了单个天线或等效辐射源的功率分布,其中图 8(b)是将超表面反射装置视作等效辐射源,其输入功率根据天线 B 参数模拟自由空间电波传播计算得到,反射的输出功率根据雷达散射截面计算得到,然后模拟射线追踪得到功率分布。



(a) 未安装超表面反射装置时信号功率分布



(b) 安装超表面反射装置后信号功率分布

图 8 起坡段弯曲巷道信号覆盖仿真结果(剖面)

Fig. 8 Simulation results of signal coverage in inclined curved roadway(profile)

从图 8(a)可看出,在起坡段弯曲巷道未安装超表面反射装置情况下,发射天线以 23 dBm 功率、线极化喇叭状定向形式向前辐射时,距发射天线 54 m 处信号功率降至-133 dBm;距发射天线 22 m 的超表面反射装置预设点位置的信号功率为-83 dBm。从图 8(b)可看出,安装超表面反射装置后以-83 dBm 辐射作为等效反射,距超表面反射装置 32 m(距发射天线 54 m)处接收机位置的信号功率为-112 dBm。

仿真结果表明,起坡段弯曲巷道内安装超表面反射装置后,距发射天线54 m处信号增益为21 dB。

### 3.2 巷道岔口仿真

参照有源基站场景,将主辅段岔口信号覆盖设置为两巷中线夹角为47°的矩形巷道,辐射点设置于断面中心指向岔口且射线与断面法线重合。发射天线与超表面反射装置相距15 m,超表面反射装置与接收机相距23 m。其他参数设置与起坡段弯曲巷道信号覆盖仿真相同。仿真得到主辅段岔口安装超表面反射装置前后的功率分布,如图9所示。

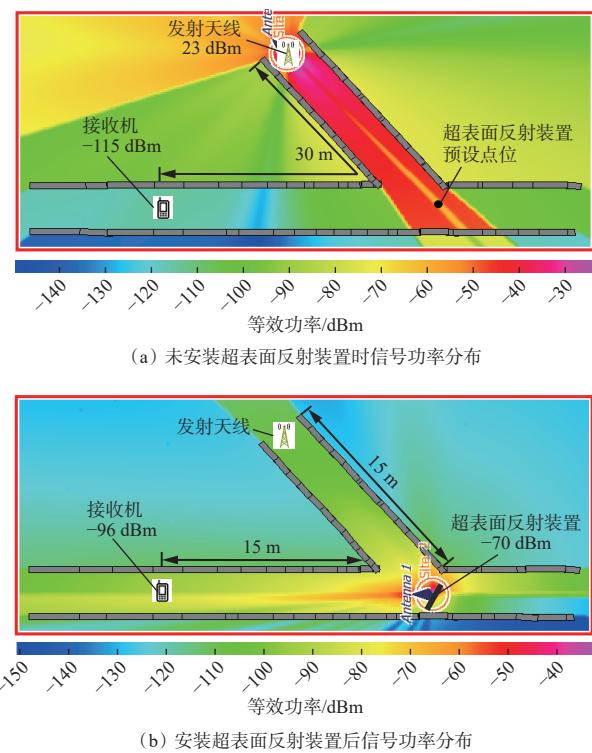


图9 主辅段岔口信号覆盖仿真结果(平面)

Fig. 9 Simulation results of signal coverage at intersection of main and auxiliary sections((plane))

从图9(a)可看出,在主辅段岔口未安装超表面反射装置情况下,发射天线以23 dBm功率、线极化喇叭状定向形式从辅助巷道向岔口辐射时,位于主平巷一侧的接收机处信号功率为-115 dBm;在距离发射天线15 m的岔口处(超表面反射装置预设点),信号功率为-70 dBm。从图9(b)可看出,在岔口安装超表面反射装置后以-70 dBm辐射作为等效反射,距超表面反射装置15 m处接收机处信号功率为-96 dBm。仿真结果表明,在巷道岔口区域安装超表面反射装置后,距发射天线30 m处信号增益为19 dB。

## 4 巷道信号覆盖测试

### 4.1 起坡段弯曲巷道测试

测试环境为清水溪巷道的起坡段弯曲巷道。超

表面反射装置部署如图10所示。在起坡段弯曲巷道内部署2块超表面反射装置,1块贴地部署,1块挂载于顶板,2块装置与水准面的夹角均约为30°,中心水平距离约为60 cm。在主平巷部署1台发射机,距贴地超表面反射装置22 m;在主斜巷部署1台接收机,距贴地超表面反射装置32 m,线极化天线采用垂直极化方式安装。

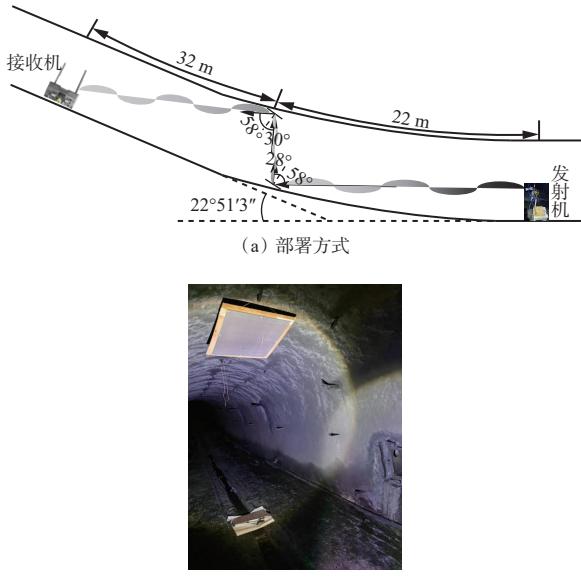


图10 起坡段弯曲巷道内超表面反射装置部署

Fig. 10 Deployment of metasurface reflection devices in inclined curved roadway

测试过程:启动发射机和接收机,在起坡段弯曲巷道内不安装超表面反射装置情况下,测量信号传播54 m后的SNR和RSRP;在巷道内安装超表面反射装置,发射机依次安装天线A和天线B,分别测量信号传播54 m后的SNR和RSRP。

### 4.2 巷道岔口测试

测试环境为清水溪巷道主辅段岔口。超表面反射装置部署如图11所示。在岔口部署1块超表面反射装置,其中心法线与水平面平行,与主平巷中心线呈30°夹角。在辅助巷道部署1台发射机,距超表面反射装置15 m;在主平巷部署1台接收机,距超表面反射装置23 m,线极化天线采用垂直极化方式安装。

测试过程:启动发射机和接收机,在岔口不安装超表面反射装置情况下,测量信号传播38 m后的SNR和RSRP;在岔口安装超表面反射装置,发射机依次安装天线A、天线B、天线C,分别测量信号传播38 m后的SNR和RSRP。

### 4.3 测试结果及分析

根据不同发射天线形式,测量了起坡段弯曲巷道、主辅段岔口2个地点安装超表面反射装置前后

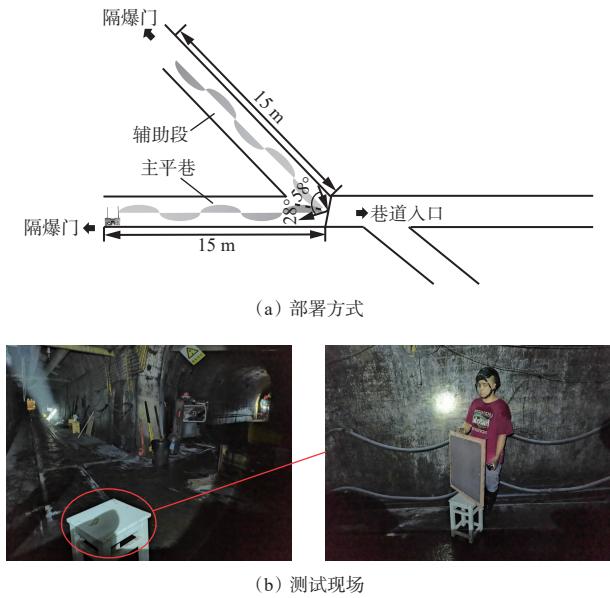


图 11 主辅段岔口超表面反射装置部署

Fig. 11 Deployment of metasurface reflection devices at intersection of main and auxiliary sections

的 SNR 和 RSRP, 计算得到二者的增益, 结果见表 1。对便于对比, 表 1 中列出了采用线极化喇叭定向天线时的仿真结果。

表 1 巷道信号覆盖测试结果

Table 1 Test results of signal coverage in roadway

实验形式	指标	起坡段弯曲巷道 环境中指标值	主辅段岔口 环境中指标值
b1	$E_1/\text{dBm}$	-133	-115
	$E_2/\text{dBm}$	-112	-96
	$G_E/\text{dB}$	21	19
a	$S_1/\text{dB}$	6	8
	$S_2/\text{dB}$	12	10
	$G_S/\text{dB}$	6	2
	$R_1/\text{dBm}$	-119	-120
	$R_2/\text{dBm}$	-115	-114
	$G_R/\text{dB}$	4	6
b2	$S_1/\text{dB}$	7	10
	$S_2/\text{dB}$	16	22
	$G_S/\text{dB}$	9	12
	$R_1/\text{dBm}$	-120	-116
	$R_2/\text{dBm}$	-108	-103
	$G_R/\text{dB}$	12	13
c	$S_1/\text{dB}$	—	8
	$S_2/\text{dB}$	—	17
	$G_S/\text{dB}$	—	9
	$R_1/\text{dBm}$	—	-116
	$R_2/\text{dBm}$	—	-110
	$G_R/\text{dB}$	—	6

注: b1—线极化喇叭状定向天线(天线B)仿真; a—线极化鞭状全向天线(天线A)巷道测试; b2—线极化喇叭状定向天线(天线B)巷道测试; c—圆极化螺旋状定向天线(天线C)巷道测试;  $E_i$ —等效接收功率,  $i=2$  为未安装超表面反射装置情况,  $i=2$  为安装超表面反射装置情况;  $G_E$ —等效接收功率增益;  $S_i$ —SNR;  $G_S$ —SNR增益;  $R_i$ —RSRP;  $G_R$ —RSRP增益。

从表 1 可看出, 采用线极化喇叭状定向天线进行仿真(b1)得到的信号增益与采用该类型天线进行巷道测试(b2)得到的结果相差 9 dB, 主要原因是存在巷道建模误差、传播参数误差、对准误差、材料损耗误差等<sup>[20]</sup>。对比线极化鞭状全向天线巷道测试(a)和采用线极化喇叭状定向天线巷道测试(b2)结果可知, 无论是在起坡段弯曲巷道还是主辅段岔口位置, 定向天线的信号增强效果均优于全向天线, 表明波束集中入射有利于增强反射信号。对比线极化喇叭状定向天线巷道测试(b2)和圆极化螺旋状定向天线巷道测试(c)结果可知, 线极化定向天线的信号增强效果优于圆极化定向天线。综合来看, 无论是在起坡段弯曲巷道还是主辅段岔口位置, 采用不同的发射天线情况下, 安装超表面反射装置后无线信号均得到不同程度的增强。

## 5 总结及展望

仿真和测试了弯曲巷道和巷道岔口处采用不同发射机天线条件下无源超表面反射技术的信号增强效果, 可知采用定向天线时 RSRP 增益最大, 为 13 dB, 与文献[10-11, 20-21]论述的实测或仿真增强效果相符。这表明无源超表面反射技术可用于信号盲区覆盖补盲, 但应用条件较为苛刻, 且存在入射波角度难对准、波束难集中、入射距离短等问题。覆盖补盲应用需准确测量地形环境、精密规划入射反射角度, 同时要求波束波瓣宽度窄、辐射能量集中、方向性强。针对这些问题, 未来仍需研究基于多层结构相位调控能力的超表面角度不敏感性、基于相控阵天线或波束成形器件的波束精确控制、基于实时相位和振幅调整的超表面动态调控机制等。

从测试结果推断: 矿井环境中适合固定部署超表面反射装置用以反射补盲, 在未进行精确无线规划的情况下临时部署超表面反射装置, 则难以保障反射补盲效果; 超表面反射传播更适合岔口补盲, 对于大曲率半径的弯曲巷道, 不应局限于超表面反射传播形式, 还应研究超表面透射传播形式; 增强 8~15 dB 信号强度一般不足以显著提高传输速率, 但可以提高一定的传输距离, 采用点对点传输可取得更好的传输距离提升效果。超表面无源反射改善传输速率、传播距离的效果仍需进一步实测验证, 是否适用于高速率业务仍待证实。目前超表面反射技术未实现完全双向反射, 解决入射波和反射波之间的相干性和相位匹配仍是应用的重大课题。

## 参考文献(References):

- [1] 王国法,任怀伟,赵国瑞,等.煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J].工矿自动化,2021,47(6):1-11.  
WANG Guofa, REN Huawei, ZHAO Guorui, et al. Analysis and countermeasures of ten 'pain points' of intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1-11.
- [2] 王国法,刘峰,庞义辉,等.煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J].煤炭学报,2019,44(2):349-357.  
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [3] 孙继平,梁伟峰,彭铭,等.煤矿井下无线传输衰减分析测试与最佳工作频段研究[J].工矿自动化,2023,49(4):1-8.  
SUN Jiping, LIANG Weifeng, PENG Ming, et al. Analysis and testing of wireless transmission attenuation in coal mine underground and research on the optimal operating frequency band[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(4): 1-8.
- [4] 孙继平.矿井无线传输的特点[J].煤矿设计,1999(4):20-22.  
SUN Jiping. Characteristics of wireless transmission in mines[J]. Coal Mine Design, 1999(4): 20-22.
- [5] 石庆冬,孙继平.弯曲矩形隧道电磁波衰减特性[J].中国矿业大学学报,2001(1):91-93.  
SHI Qingdong, SUN Jiping. Attenuation characteristic of guided EM waves in curved rectangular mine tunnel[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001(1): 91-93.
- [6] 李大伟.受限空间电波覆盖特性的研究[D].北京:北京交通大学,2016.  
LI Dawei. Research on the radio coverage characteristics in confined space[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] TALBI L, GHADDAR M. Experimental characterization of NLOS broadband millimeter wave links[C]. Institution of Engineering and Technology International Conference on Wireless Communications and Applications, Kuala Lumpur, 2012. DOI: [10.1049/cp.2012.2073](https://doi.org/10.1049/cp.2012.2073).
- [8] KIM B, KIM H, CHOI D, et al. 28 GHz propagation analysis for passive repeaters in NLOS channel environment[C]. The 9th European Conference on Antennas and Propagation, Lisbon, 2015: 1-4.
- [9] HA D, CHOI D, KIM H, et al. Passive repeater for removal of blind spot in NLOS path for 5G fixed wireless access (FWA) system[C]. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, San Diego, 2017. DOI: [10.1109/apusncursinrsm.2017.8073067](https://doi.org/10.1109/apusncursinrsm.2017.8073067).
- [10] 刘海霞,易浩,马向进,等.基于无源可重构智能超表面的室内无线信号覆盖增强[J].通信学报,2022,43(12):32-44.  
LIU Haixia, YI Hao, MA Xiangjin, et al. Indoor wireless signal coverage and enhancement based on passive reconfigurable intelligent metasurface[J]. Journal on Communications, 2022, 43(12): 32-44.
- [11] 费丹,陈晨,郑鹏,等.基于智能超表面的室内覆盖增强技术研究与实验验证[J].电子与信息学报,2022,44(7):2374-2381.  
FEI Dan, CHEN Chen, ZHENG Peng, et al. Research and experimental verification of reconfigurable intelligent surface in indoor coverage enhancement[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(7): 2374-2381.
- [12] 李世银,张鹏,闵明慧,等.智能反射面技术及其在煤矿井下无线盲区覆盖的应用探讨[J].工矿自动化,2023,49(6):112-119.  
LI Shiyin, ZHANG Peng, MIN Minghui, et al. Discussion on intelligent reflecting surface technology and its application in wireless blind spot coverage in coal mines[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(6): 112-119.
- [13] 李世银,杨瑞鑫,杨磊,等.煤矿井下智能超表面非视距无线覆盖技术综述[J].中国矿业大学学报,2024,53(3):613-622.  
LI Shiyin, YANG Ruixin, YANG Lei, et al. Survey of the non-line-of-sight wireless coverage technology by reconfigurable intelligent surfaces in underground coal mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 613-622.
- [14] WU Qingqing, ZHENG Shuowen, ZHENG Beixiong, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [15] HUM S V, OKONIEWSKI M, DAVIES R J. Realizing an electronically tunable reflectarray using varactor diode-tuned elements[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters: a Publication of the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, 2005, 15(6): 422-424.
- [16] RIEL M, LAURIN J. Design of an electronically beam scanning reflectarray using aperturecoupled elements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(5): 1260-1266.

(下转第 56 页)

- environments using triggerable-polymer metasurfaces[J]. *Polymers*, 2023, 15(3). DOI: [10.3390/polym15030545](https://doi.org/10.3390/polym15030545).
- [14] MARINICA D C, BORISOV A G, SHABANOV S V. Bound states in the continuum in photonics[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(18). DOI: [10.1103/PhysRevLett.100.183902](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.183902).
- [15] 姚建铨, 李继涛, 张雅婷, 等. 周期光学系统中的连续域束缚态[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(1): 1-23. YAO Jianquan, LI Jitao, ZHANG Yating, et al. Bound states in continuum in periodic optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 1-23.
- [16] LIU Bingwei, PENG Yan, JIN Zuanming, et al. Terahertz ultrasensitive biosensor based on wide-area and intense light-matter interaction supported by QBCB[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 462. DOI: [10.1016/j.cej.2023.142347](https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142347).
- [17] WANG Ride, XU Lei, HUANG Lujun, et al. Ultrasensitive terahertz biodetection enabled by quasi-BIC-based metasensors[J]. *Small*, 2023, 19(35). DOI: [10.1002/smll.202301165](https://doi.org/10.1002/smll.202301165).
- [18] 刘海, 周彤, 陈聪, 等. 基于 Fano 共振的全介质型超表面甲烷传感器设计[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(9): 106-114. LIU Hai, ZHOU Tong, CHEN Cong, et al. Design of all dielectric metasurface methane sensor based on Fano resonance[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(9): 106-114.
- [19] CHEN Xu, FAN Wenhui, JIANG Xiaoqiang, et al. High-Q toroidal dipole metasurfaces driven by bound states in the continuum for ultrasensitive terahertz sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(7): 2181-2190.
- [20] LEI Pengliang, NIE Guozheng, LI Huilin, et al. Multifunctional terahertz device based on plasmon-induced transparency[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(7). DOI: [10.1088/1402-4896/ad5120](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad5120).
- [21] 王帅. 基于 SPR 的光纤甲烷气体传感研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021. WANG Shuai. Research on fiber optic methane gas sensing based on SPR[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [22] 郭岩宝, 刘承诚, 王德国, 等. 甲烷传感器气敏材料的研究现状与进展[J]. *科学通报*, 2019, 64(14): 1456-1470. GUO Yanbao, LIU Chengcheng, WANG Deguo, et al. Advances in the development of methane sensors with gas-sensing materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(14): 1456-1470.
- [23] YANG Jianchun, ZHOU Lang, CHE Xin, et al. Photonic crystal fiber methane sensor based on modal interference with an ultraviolet curable fluoro-siloxane nano-film incorporating cryptophane A[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 235: 717-722.
- [24] CHEN Yuxuan, SUN Yongzheng, ZHOU Weijun, et al. Conductively coupled terahertz metamaterials with dual functions of electromagnetically induced transparent and Fano effects for sensing applications[J]. *Physica Scripta*, 2024, 99(10). DOI: [10.1088/1402-4896/ad7338](https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad7338).
- [25] CHEN Yiqin, BI Kaixi, WANG Qianjin, et al. Rapid focused ion beam milling based fabrication of plasmonic nanoparticles and assemblies via "sketch and peel" strategy[J]. *ACS Nano*, 2016, 10(12): 11228-11236.
- [26] RUSSELL B J, MENG Jiajun, CROZIER K B. Mid-infrared gas classification using a bound state in the continuum metasurface and machine learning[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(19): 22389-22398.
- (上接第 47 页)
- [17] MAKDISSY T, GILLARD R, FOURN E, et al. Phase-shifting cell loaded with variable capacitances for dual linearly polarized reflectarrays[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1319-1320.
- [18] DORST L, FONTIJNE D, MANN S. Geometric algebra for computer science[M]. Amsterdam: Elsevier Science Ltd., 2007.
- [19] 李双德, 刘莞健, 林乐科. 28 GHz 室内毫米波信道路径损耗模型研究[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(5): 602-611. LI Shuangde, LIU Yuanjian, LIN Leke. Path loss models of millimeter-wave channel in indoor environment at 28 GHz[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(5): 602-611.
- [20] 方遥. 宽带平面反射阵设计及 5G 毫米波室内通信应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. FANG Yao. Research on the design of broadband reflectarray antenna for indoor 5G millimeter wave communication applications[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.
- [21] 乐舒瑶. 基于可重构反射超表面的室内无线信号覆盖[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. LE Shuyao. Indoor wireless signal coverage based on reconfigurable reflective metasurfaces[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2022.