

煤矿井下智能超表面非视距无线覆盖技术综述

李世银^{1,2}, 杨瑞鑫¹, 杨磊¹, 沈胜强^{1,2}, 李飞飞^{1,2}, 胡青松^{1,2}

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 地下空间智能控制教育部工程中心, 江苏 徐州 221116)

摘要: 煤矿井下环境存在大量的弯道、岔道、硐室和大型设备遮挡等非视距(Non-Line of Sight, NLOS)场景, 导致煤矿井下无线通信覆盖范围受限且盲点和盲区多。在综采工作面等关键场景, 无线通信覆盖能力与传输需求的矛盾更为突出。近年来出现的智能超表面(Reconfigurable Intelligence Surface, RIS)技术为解决煤矿井下 NLOS 场景无线覆盖难题提供了新途径和新思路。本文在介绍了 RIS 系统结构与特点基础上, 讨论了 RIS 在煤矿井下巷道、硐室和综采工作面等典型 NLOS 场景的应用优势, 以及需要进一步研究解决的信道测量与建模、近场效应、波束成形和部署规划等关键技术问题与基本思路, 为解决煤矿智能化开采所需要的可靠通信技术难题指明了新方向。

关键词: 智能超表面(RIS); 非视距(NLOS)覆盖; 被动中继; 煤矿井下

中图分类号: TD 655 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2024)03-0613-10

Survey of the non-line-of-sight wireless coverage technology by reconfigurable intelligent surfaces in underground coal mines

LI Shiyin^{1,2}, YANG Ruixin¹, YANG Lei¹, SHEN Shengqiang^{1,2}, LI Feifei^{1,2}, HU Qingsong^{1,2}

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Control for Underground Space, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In underground coal mines, there are a large number of non-line of sight (NLOS) scenarios, such as curves, forks, caverns, and large equipment obstructions, which result in limited wireless coverage and many blind spots. In critical areas such as the comprehensive working face, the conflict between the wireless coverage capability and transmission requirement is even more apparent. Recently, a novel route to solve this troublesome problem has been provided through an emerging technology-the reconfigurable intelligence surface (RIS). In this paper, RIS's structure and characteristics were introduced, and the RIS's applications advantages were discussed in typical NLOS scenarios in underground coal mines, including the roadways, caverns, and comprehensive work faces. Meanwhile, some key technical issues and basic research ideas were presented, including channel measurement and modeling, near-field effects, beamforming, and deployment programming, which require further investigation and

收稿日期: 2023-04-24 修回日期: 2023-07-24 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.20230197

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371451)

通信作者: 李世银(1971—), 男, 四川省犍为县人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事无线通信方面的研究。

E-mail: lishiyin@cumt.edu.cn Tel: 13805208576

引用格式: 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.

resolution. A new direction was indicated to address the challenges of reliable transmission for intelligent coal mining.

Key words: reconfigurable intelligent surface; non-line-of-sight coverage; passive relay; underground coal mine

煤矿智能化的发展愿景是实现煤矿全时空多源信息实时感知,风险闭环管控本质安全,全流程的人员-机器-管理数字互联高效协同运行,生产现场全自动化作业,使得煤矿职工更有尊严更加安全,煤炭企业创造更多价值^[1].煤矿智能化是第五代(5G)移动通信技术、大数据、物联网和人工智能等新一代信息技术与煤矿开采、掘进、机电、运输、通风和排水等全系统全生产工艺流程的深度融合,而矿井无线通信与矿用 5G 移动通信技术是关键支撑技术之一^[1-9].国家发展与改革委员会、国家能源局等八部委也于 2020 年 2 月联合发布了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,推动了煤炭行业先进技术的快速落地应用.Wi-Fi 和第四代(4G)移动通信等技术因具有传输带宽大、传输距离远、基站和终端设备体积小重量轻、兼顾话音和数据业务等优势,已经广泛应用于煤矿井下,并在过去不同时期,基本满足了当时生产作业对于话音通信、视频监控、视频会议、人员定位和数据传输等业务的需求.但是两者在传输可靠性、传输时延和用户接入数量等方面,都难以满足和支持煤矿智能化对于低时延、高可靠无线通信的需求.近年来随着技术演进,5G 移动通信技术的应用有效推进了煤矿智能化、少人化与无人化进程,将 5G 移动通信技术应用于煤矿智能化开采是未来煤矿开采的必由之路^[8-11].

但是煤矿井下的业务需求和传播环境同地面常规室内、外场景和工业场景有着很大不同,这两方面因素共同制约和影响 5G 移动通信技术以及其他无线通信技术在煤矿井下的直接应用.

在煤矿井下狭小的有限空间内,分布有大量复杂多变的非结构巷道和硐室,存在金属防护网、支护、机电设备、车辆等随机的大型遮挡物和散射体,并且大功率突发电磁干扰较多.因此,煤矿井下存在大量的非视距传播场景,同时无线信道的阴影衰落和多径衰落更加严重且复杂多变,不仅导致小区边缘覆盖困难,也使得小区内部存在众多覆盖盲区、盲点^[12-16].

同时巷道、硐室、煤层和岩层多为表面不规则不均匀的非均质材料,空气中多粉尘多水雾,加之设备、车辆和人员的移动变化,引起无线信号的反

射、吸收和衰减特性时变性和空间多样性,导致传输速率、中断概率和网络时延等性能大打折扣,而信道测量与建模也是煤矿井下无线通信难点之一.

由于安全生产要求和实地条件限制,煤矿井下无线通信系统难以采用常见方法来应对复杂剧烈的衰落和急剧退化的传输距离.

煤矿井下生产作业对电气防爆安全性有着十分严格的规定,根据煤炭安全规程无线发射功率必须小于 6 W,有源天线必须经过单独矿用安全认证^[17-18],限制了通过提高发射功率增强通信质量的可能性,也限制了高增益有源天线和有源基站的使用.此外,专用光缆敷设条件、井下电网取电窗口、天线架设位置等因素也导致煤矿井下无线基站数量和密度不能无限制地任意增加.

因此,亟需综合考虑生产需求、安全要求和实地条件,研究与设计增强无线信号传播距离和绕射能力的方法,从而克服煤矿井下复杂非结构有限空间的恶劣传播环境,实现低成本、高速、可靠、稳定、安全的无线传输.同时针对长达数公里到数十公里的超长矿井巷道,以及存在多遮挡复杂多径的综采工作面和掘进工作面等专门场景提出定制化方案^[19-20].

近年来,智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)因其能够重塑信道环境,为无线通信的未来发展提供了一个新的思路,已成为后 5G/第六代(B5G/6G)移动通信网络的一项关键候选技术^[21-22].RIS 通常由超表面天线阵列和控制器组成,其天线阵列由大量可独立调控的无源电磁单元构成,并且可以根据信道状态信息,动态调整反射信号的幅度、相位和极化特性,从而实现无线环境的智能控制.

这也为煤矿井下无线通信系统研究与设计提供了新方法和新思路.目前, RIS 在煤矿井下的应用基本处于空白,仅有少量相关研究^[23-24],但并未针对煤矿井下环境和信道特性进行专门讨论和优化.因此,本文将引入 RIS 的部署与应用为着眼点,讨论 RIS 技术在煤矿井下环境中需要着重关注的难点问题和解决思路.

1 智能超表面系统结构与特点

RIS 是一种具有可编程电磁特性的人造二维

阵列,由大量人为精心设计亚波长电磁单元构成,可以实现与天然材料不同的超常物理特性,例如可以使电磁波反射或透射方向不再遵循斯涅尔定律^[25-26].智能超表面分为反射型和透射型 2 种形态,通过改变电磁单元的相位、幅度和极化等特性,分别对电磁波的反射特性和透射特性进行人工调控,并且调控过程为无源被动信号处理,仅依赖于电磁单元的物理特性,无需有源主动的射频和基带信号处理模块参与.

反射型 RIS 的典型硬件结构如图 1 所示,通常由 3 个子层和 1 个控制器组成^[27].最外层是由数字超材料制成的大量反射电磁单元,经过人为设计和排列,集成为二维天线阵列.中间层为铜制背板,用以防止能量泄露.最内层为控制电路板,与控制器连接,用以独立调节每一个电磁单元的相位、幅度和极化特性,并与控制器相连接,实现对无线环境的智能控制.控制器通过有线或无线方式,同网络其他部分进行信令和信道信息交换.透射型 RIS 也使用类似结构,但去掉了中间铜制背板,使电磁波能够穿透 RIS.

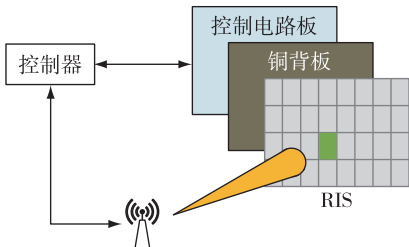


图 1 反射型 RIS 基本结构
Fig. 1 Basial structure of reflect-type RIS

RIS 自身结构特点也带来了以下 4 个方面的独特优势:

- 1) 无源,不会引入热噪声,功耗低,满足绿色通信的要求;
- 2) 低成本,不需要混频器、数模/模数转换器、功率放大器等高成本器件;
- 3) 易部署,超薄可扩展的结构和轻量化的设计使其具有安装、拆卸容易的特点;
- 4) 连续表面任意点均可重构电磁波,可构成任意形状表面以适应不同应用场景,支持更高的空间分辨率.

RIS 通过对反射信号或透射信号进行波束成形,实现良好的空分多址和多径干扰抑制效果,并可以作为被动中继节点,将 NLOS 链路转化为“无线基站-RIS-用户”的虚拟直射链路,从而有效扩展无线覆盖范围,提高网络频谱效率和能量效率,以及通信可靠性.

智能超表面具有全频段响应特性,支持全双工传输,且面积大,接收能量高,与无线中继方案^[28]相比,RIS 无需对接收信号进行解码转发和放大转发,结构简单易于部署.从图 2 和图 3 所示的仿真结果来看,随着电磁单元数量和 RIS 总面积的增加,自由空间中的频谱效率得到了显著改善,当表面面积充分大时,能够明显超越多天线解码转发(Decode-and-Forward,DF)中继^[29].

此外,RIS 的二维超薄结构,可以方便地附着于建筑物、机械设备、家具物品的表面,有利于室内和室外密集部署.同时功耗低,无额外电磁污染等特性,也使其在工程实践中具有天然优势.

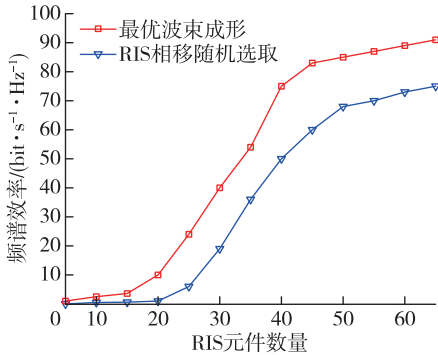


图 2 RIS 辅助通信频谱效率与 RIS 元件数量关系
Fig. 2 The relationship between RIS-assisted communication spectrum efficiency and the number of RIS components

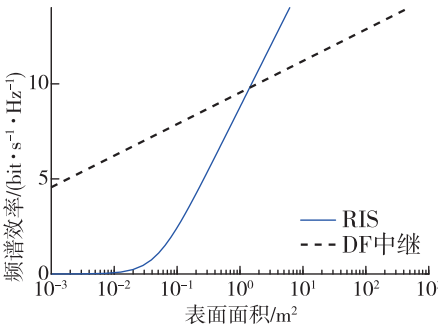


图 3 RIS 被动中继和多天线 DF 中继性能对比
Fig. 3 The performance comparison of RIS passive relay and multi-antenna DF relay

2 智能超表面在煤矿井下应用场景

为了解决煤矿井下无线传输距离受限且覆盖盲点多等问题,传统解决手段主要是增加无线基站、协作节点、中继节点,或使用漏泄电缆作为发射天线,但是这些方法普遍系统结构复杂,建设、使用和维护成本较高,并产生了小区间干扰严重、移动终端基站频繁切换等新问题^[30-32].此外,煤矿井下场景对于有源设备有着严格的安全规范,同时受限于供电、网络接入和空间结构等现场条件,

并不能任意增加通信基站和节点。

RIS 的无源、低功耗、易部署、低成本等优势,使其尤为适合对有源设备存在严格安全规范的煤矿井下场景,为增强煤矿井下巷道、硐室和综采工作面的无线网络覆盖提供了新途径和新思路。

2.1 基于 RIS 辅助的巷道硐室覆盖增强

对于多分枝树形结构的井下巷道与硐室,由于巷道壁的阻挡,无线信号难以有效覆盖转弯与分叉处,形成通信盲区。同时巷道壁的反射、大型设备与车辆的阻挡会进一步加剧阴影衰落和多径干扰,导致煤矿井下视距无线通信可靠性和传输距离也远低于地面自由空间。

但是以协作微基站或主动中继节点为代表的传统有源解决方案,受限于煤炭安全规程、最大功率限制、顶板高度、巷道宽度和环网接入等实际条件,难以在网络建成后,再根据网络质量和生产进度动态任意调整和大批量增加,面临有源设备安全性、供电和入网接口有限、可部署位置有限、部署与运行维护成本高昂和能源消耗大等问题。作为无源器件,基于 RIS 可以实现低功耗、部署灵活的被动中继方案,增强巷道和硐室覆盖。

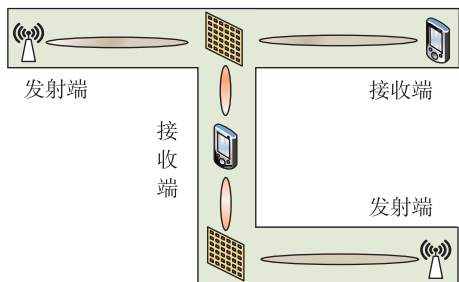


图 4 煤矿井下巷道内 RIS 部署示意

Fig. 4 A schematic diagram of the RIS deployment in the underground roadway of the coal mine



图 5 煤矿井下硐室内 RIS 部署示意

Fig. 5 A schematic diagram of the RIS deployment in the underground cavern of the coal mine

对于如图 4 和图 5 所示的煤矿井下巷道与硐室示意图,通过在转弯处、分岔口和硐室的墙壁或设备表面部署 RIS 作为被动中继节点,利用受控反射使得信号以更低损耗绕过障碍物,形成发射

端-RIS-接收端的虚拟直射链路。虽然目前尚缺乏针对于煤矿井下环境的研究,但是对于常规室内场景已经有相关研究和测试,证明了 RIS 被动中继能够有效改善室内无线通信性能和覆盖范围。同时对于室外补盲覆盖也已经有了大量工作,充分表明了 RIS 被动中继的潜力。

RIS 被动中继尤为适合煤矿井下一些无需高速传输,或更关注覆盖范围的场景,例如低速率低功耗传感器接入、区域临时通信网,以及水泵、车辆、变电站等大型设备阴影区域覆盖等。此时,RIS 可以采用静态或准静态配置方案,即使用固定预编码方案,或维持很低的码本更新频率,使得波束指向在一段时间内保持不变,从而降低功耗和控制信令开销。特别地,静态配置的 RIS 甚至可以仅依靠电池供电,无需光纤回传链路,从而实现随时组网,按需部署。

2.2 基于 RIS 辅助的综采工作面覆盖增强

综采工作面是煤矿事故主要发生地,因此,综采工作面的少人化、无人化和智能化,是建设安全、高效、绿色、智能矿井的关键^[33]。综采工作面的远程监测与远程控制依赖于多路高清视频监控和多路实时可靠控制信息,这些业务尤为需要大带宽、低时延、高可靠的通信网络的支持。此外,由于综采工作面移动需要,为了便于安装、使用和维护,摄像机和传感器等都宜用无线接入。但综采工作面无线通信目前仍是煤矿井下通信难点与痛点之一。

为了便于维护和使用,避免各类线路在综采工作面移动过程中损坏,综采工作面的无线基站一般部署于工作面两端。此外,对于顶板高度不足 1 m 的薄煤层,难以在综采工作面中部部署新增无线基站。然而由于采煤机、掘进机,以及密集的金属液压支架和锚杆的阻挡,无线信号衰减更为迅速,多径干扰和阴影衰落更为明显,位于两端的无线基站通常难以实现综采工作面无线全覆盖的需求。另一方面,高速无线传输的需求在未来会越来越明显,仅依靠综采工作面两端的无线基站难以满足要求。

利用 RIS 外形可塑性的特点,可以将反射型 RIS 覆盖于液压支架外表面,例如图 6 中的部署方式,作为分布式单元,然后控制器间通过综采工作面网络或短距离无线通信相互连接。一方面可以有效减少金属支架对于无线信号的吸收,削弱非视距传播,另一方面,通过多个反射型 RIS 相互协作,可以形成面积更大的 RIS,从而如同凹面镜一样,控制无线信号汇聚到指定目标,增强接收信噪

比,提高传输速率。

此外,如果将透射型 RIS 悬挂于液压支架上,并配合反射型 RIS,则可以赋予无线信号更强的绕射能力,通过多跳 RIS 被动中继,将无线信号延伸到综采工作面中部。

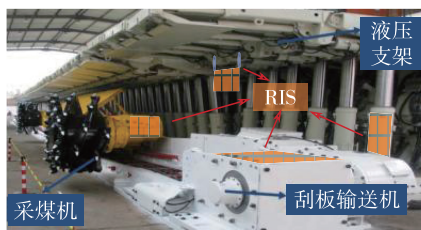


图6 煤矿综采工作面 RIS 部署示意

Fig. 6 A schematic diagram of the RIS deployment in the comprehensive working face

现有的 RIS 研究通常假设 RIS 位置固定,对移动位置 RIS 的研究极少,文献[34]将 RIS 安装在无人机、热气球等移动空中平台上,分别构建了“基站-RIS”、“RIS-用户”的信道模型,并通过联合优化基站波束成形、RIS 被动波束成形和 RIS 的移动轨迹,实现最坏情况下的 SNR 最大化。但是文献假设基站、目标用户坐标和 RIS 移动轨迹坐标都为已知,且忽略了基站-RIS、RIS-用户之间的多径效应以及位置误差对于波束成形设计的影响。煤矿井下综采工作面的设备随着采煤工作推进而移动,导致部署在设备上的 RIS 与基站之间相对位置动态变化,给基站的主动波束成形和 RIS 的被动波束成形设计方案带来挑战,这也是煤矿井下 RIS 部署需要进一步考虑的问题。

3 RIS 在煤矿井下应用的关键技术与难点

3.1 RIS 耦合信道的建模与测量

在无线通信系统中引入 RIS 后,传播链路和路径等会发生变化,形成具有全新模式的 RIS 耦合信道,目前 RIS 耦合信道无线传播特性的研究尚不充分,而煤矿井下 RIS 耦合信道测量与建模更属于空白领域^[27,35]。

以如图7所示的煤矿井下 RIS 介入 NLOS 典型场景为例,由于煤矿井下属于受限空间,普遍存在大量巷道转弯与分岔、硐室、大型设备和设施遮挡,阴影效应和多径效应也更为显著和复杂,不同路径的信号会因到达角差异,在经过 RIS 反射后出现较大差异。

现有 RIS 应用研究普遍基于自由空间假设,直接沿用瑞利信道模型或第三代移动通信项目组织(3GPP)与国际电信联盟定义的标准化无线信道模型,并将 RIS 相位响应简化为对角阵^[36-39],从

而有效降低问题模型与分析难度。

但是这些方法未充分考虑引入 RIS 导致的传播链路变化及新链路与原有链路的相互作用,并且基于自由空间的研究成果难以准确反映煤矿井下受限空间的真实信道状态,复杂的多径效应和阴影效应会加剧了这种差异,影响 RIS 应用效果。因此,将 RIS 应用于煤矿井下无线通信时,将发射端、RIS 和接收端之间的多径效应和阴影效应考虑在内,进行信道测量与建模是十分必要的。

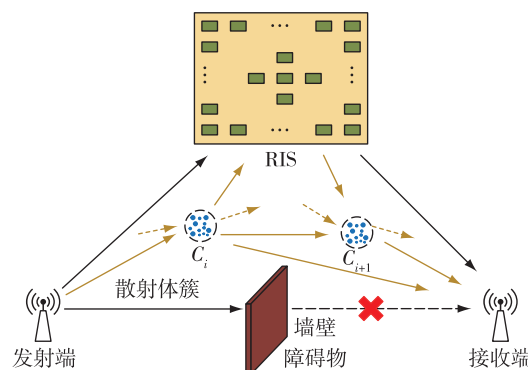


图7 RIS 耦合信道系统模型

Fig. 7 The system model of RIS coupled channel

目前针对 RIS 耦合信道建模的研究工作普遍沿用射线追踪法和多径分簇理论等经典方法,围绕自由空间中尺度衰落或简单多径信道建立理论模型^[40-43],一般只涉及了单载波窄带信号的远场传播特性,关于实际场景中 RIS 耦合信道的研究成果还较少。文献[40-41]将 RIS 等效为理想反射体或虚拟散射体簇,在不考虑多径效应和阴影效应条件下建立了自由空间路径损耗模型。文献[42-43]采用射线追踪法和多径分簇理论等经典方法,建立了存在多径效应的自由空间信道模型,但对多径数量和散射体特性进行了较大简化,忽略了 RIS 和接收端之间多径效应。

另一方面,固定位置和平面朝向是 RIS 典型部署方式之一,但在现有 3GPP 4G 和 5G 标准中,用户终端和散射体的指向都认为服从随机分布。这一不同会导致多径信号到达 RIS 的角度不再能够简化为随机模型,而是与散射体位置存在直接关联,RIS 阵列响应和无线信号离开角与散射体空间位置与特性直接关联。此时,基于簇的经典信道建模方法会遇到很大挑战,多径分簇难度会显著增加,这也是 RIS 耦合信号传播特性研究难点之一。在煤矿井下复杂多径环境中,这一问题会更加突出,需要研究传播环境与无线电传播特征相互结合的 RIS 信道建模新方法。

3.2 大规模 RIS 的近场效应

当使用大规模电磁单元阵列时,RIS 几何尺寸和单元数量远大于传统通信系统中的天线阵列,电磁波可能会出现明显的近场传播特性.由于煤矿井下的空间受限,如图 8 所示,巷道高度一般约为 3.5 m 左右,宽度约为 4.5~5.0 m,而综采工作面和掘进工作面会更为狭小,接收端处于 RIS 近场区域的可能性会远高于常规地面部署,特别是多 RIS 协作场景和地面放置的静态 RIS 应用场景.现有大部分 RIS 应用研究多基于远场通信假设,对于近场传播特性研究很少.

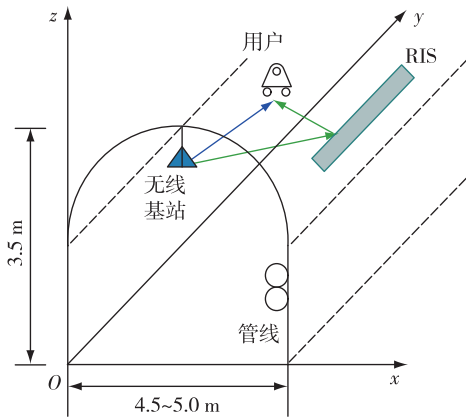


图 8 巷道内无线基站与 RIS 联合部署示意
Fig. 8 The base station and RIS deployment in the underground roadway of the coal mine

根据现有研究^[44-46],当空间中不同位置的接收信号最大相位差不超过 $\pi/8$ 时,可以认为此时接收端处于信号源的远场区,因此,RIS 与接收端的远、近场边界条件为

$$L = \frac{2D^2}{\lambda}, \tag{1}$$

式中: L 、 D 和 λ 分别为 RIS 与接收端的中心距离、RIS 最长尺寸和无线信号波长,单位均为 m,同时根据天线阵列互易性,也可以得到无线基站到 RIS 的远、近场边界条件.此外,上述公式假设当发送端或接收端同 RIS 的每个电磁单元的距离始终大于 5λ ,以保证单独电磁单元可以只考虑其远场分量,通常用于辅助无线通信的 RIS 尺寸均在 10λ 以上.

根据式(1),计算得到的常见无线信号频率的近场边界如表 1 所示.当 RIS 在如图 8 所示的巷道中进行部署时,巷道高度与宽度与 RIS 近场范围相当,或者明显小于近场分界条件,几乎无法避免用户接收端工作于近场区域.因此,在煤矿井下受限空间中,RIS 近场工作状态的电磁辐射特性和球面波传播特性是未来研究中必须考虑的问题.

表 1 不同频率的近场边界条件
Table 1 Near field boundary of different frequencies

信号频率/GHz	远、近场边界条件/m	
	$D = 1$	$D = 10\lambda$
0.75	5.00	80.00
1.90	12.67	31.58
2.40	16.00	25.00
5.80	38.67	10.34
30.00	200.00	2.00

3.3 无线基站与多 RIS 联合稳健波束成形

自由空间无线基站与 RIS 联合波束成形已经得到了广泛关注与研究^[47-49],但是对于受限空间和存在多径效应的场景目前研究相对较少.

RIS 最优波束成形问题通常为多约束多变量的复杂非凸优化问题,计算复杂度高,也难以直接获得最优解.同时除了部分特殊场景,如只有 LOS 路径的单 RIS 单用户系统,通常也难以建立 RIS 波束成形性能与信道参数的理论表达式.

现有研究主要是通过问题凸化、迭代和交替优化策略来求解原始问题的次优数值解,例如半正定松弛、连续凸近似和块坐标下降法等,实现总功率、信噪比、和速率等性能指标的优化.但是上述方法需要反复多次迭代,计算复杂度往往较高,难以适用于实际时变信道的动态波束成形,并且次优解的实际效果也可能达不到理论预期.

为了提高无线通信覆盖范围和传输速率,煤矿井下需要无线基站与多台 RIS 协作动态调控,导致优化问题规模更大,同时约束条件也远比自由空间复杂,传统优化方法难以满足煤矿井下多 RIS 实时动态调控的需要.因此,需要进一步研究低计算复杂度的波束成形优化方法.

通过将机器学习同波束训练、波束预测相互结合,可以有效避免使用迭代和交替优化方法,目前也已经在 RIS 波束成形研究中得到了应用^[22,50-52],这也使得 RIS 在煤矿井下大规模部署成为可能.例如采用增强学习策略,将通信性能目标作为奖励,以无线基站和 RIS 波束成形编码作为动作,通过在实际传播环境中的交互使用和信息反馈,实现无线基站和 RIS 联合波束成形,然后通过融合无线基站、RIS 和用户设备的运动状态信息,可以进一步实现波束预测.此外,机器学习也可以更好地应对煤矿井下无线信道的时变性和空间多样性,波束训练与预测具有更好的时空泛化性和自适应性,避免一时一地对应一套专门波束成形码本.

但是基于机器学习的 RIS 波束训练与预测的研究也主要针对自由空间场景中, 已知准确信道状态信息情况下的波束成形设计, 关于非完美信道状态信息的稳健设计研究较少, 亟需进一步研究。

对于煤矿井下场景, 复杂的阴影效应和多径干扰会导致信道模型与信道估计准确性更低, 基于完美信道状态信息假设的波束成形方案不能满足实际需要。此外, 对于综采工作面等特殊场景, 附着于液压支架表面的无线基站和 RIS, 会随着液压支架一同移动, 尽管移动速度较低, 但也会引起信道特性改变, 导致波束成形方案效果下降。

因此, 对于煤矿井下无线基站与多 RIS 联合稳健波束成形问题, 不仅需要进一步研究考虑实际信道特性与实际约束条件的低计算复杂度优化方法, 同时也必须针对信道估计误差、移动性误差和环境因素进行稳健波束成形设计。

3.4 煤矿井下无线基站与智能超表面联合部署规划

作为煤矿井下通信系统的组成, 无线基站和 RIS 的部署方案既需要考虑生产过程的网络覆盖和维护便利性, 也需要满足煤炭安全规程, 以及现场的供电、环网接入、悬挂位置的限制。因此, 在实际安全部署之前, 结合实地测量, 进行无线基站与 RIS 联合部署规划与仿真模拟尤为重要。

与地面无线基站选址规划问题不同, 煤矿井下无线信道测量与建模不完善, 并且实际无线传播特性复杂多变, 并且可用的部署位置相对有限。因此, 在进行煤矿井下无线基站与 RIS 联合部署规划前, 需要在无线通信服务区域进行信道测量以及三维空间测量与重构, 勘察筛选可能安装位置, 建立仿真模拟的空间约束。对于联合部署规划问题, 需要充分考虑:

- 1) 无线基站和 RIS 通信覆盖范围;
- 2) 小区内最大用户数量、单用户最大速率、单用户最小速率与中断概率;
- 3) 巷道硐室的高度与结构限制下的天线悬挂高度与倾角;
- 4) 根据实地安装限制、硬件成本和波束成形增益, 决定天线阵列和 RIS 规模与尺寸;
- 5) 巷道、硐室和综采工作面等不同场景导致的无线通信需求和无线传播特性差异。

首先通过人工定性判断部署方案是否符合实际情况, 然后通过仿真模拟验证部署方案的性能。在仿真模拟过程中, 需要根据部署场景和入射、出

射位置信息以及信道测量结果等, 进行无线基站与 RIS 联合波束成形, 验证是否能够满足覆盖范围和服务质量的需求, 同时完善通信性能与 RIS 面积、倾角等参数的数值关系。

结合定性分析和数值仿真, 分析部署方案是否满足需求, 如果不符合需求, 则需要进一步考虑增加站点数量、改变站点位置与倾角等, 最终得到合理的部署规划方案, 以及最佳波束成形参考码本。

具体而言, 煤矿井下水泵房、机电硐室和带式输送机等固定岗位目前已经能够实现无人值守和地面远程控制, 空间结构和场景也相对固定, 需要安装高清摄像头和大量传感器, 用以监控设备运行状况。但是硐室内无线基站数量一般较少, 并且水泵、变电站和输送机等大型设备也会引起许多覆盖死角, 启停过程也可能产生电磁干扰。因此, 在制定部署方案时, 需要配合摄像头和传感器的位置和需求, 定向增强信号覆盖, 也可以考虑在设备附近和外壳覆盖 RIS, 屏蔽或削弱干扰信号。

巷道空间结构更为多样化, 存在各种断面、分支、弯曲、倾斜和支护, 以及线缆、管道、铁轨和钢梁等金属导体, 无线基站普遍沿巷道纵向延伸。在部署 RIS 时, 可以优先关注小区边缘和空间结构变化点, 提高小区边缘用户服务质量。此外, 煤矿井下胶轮车、电机车等矿用车辆和作业人员还需要无线定位业务支持, 需要针对定位性能指标进行联合部署规划。

综采工作面场景更为复杂, 也是煤矿智能化、无人化和少人化的重点。由于适宜部署无线基站和 RIS 的位置有限, 并且生产环境不便于频繁测量和反复调试, 需要更加充分的部署规划仿真模拟, 并考虑 RIS 随着采煤机、刮板运输机和液压支架等共同移动的情况, 并针对无人远程控制进行高可靠低时延无线网络的进一步研究。

4 结 论

无线通信技术应用有效推进了煤矿智能化、少人化和无人化进程, 但煤矿井下受限空间内复杂多径干扰和阴影衰落导致现有无线通信网络的性能瓶颈。而智能超表面的提出, 使得智能调控无线传播环境成为了可能, 同时智能超表面具有的无源、低功耗和易部署的特点也使其适于煤矿井下场景应用。本文对智能超表面结构与特点、煤矿井下典型应用场景以及关键技术问题进行了简要综述和讨论, 提出通过在巷道、硐室和综采工作面

部署智能超表面,实现无源被动中继,有效改善煤矿井下无线信号覆盖盲区。但是现有智能超表面理论和应用尚不成熟,本文对需要进一步研究的信道建模、信道估计、波束成形和链路部署等关键技术难点进行了分析讨论。此外,还需要针对煤矿井下受限空间多径信道以及近场传播特性进行研究,并考虑实际限制条件和工作状态,设计低计算复杂度波束成形,建立多智能超表面协作网络的全网络仿真模拟与部署规划。

参考文献:

- [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 Huaiwei, 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] 刘峰,曹文君,张建明. 持续推进煤矿智能化 促进我国煤炭工业高质量发展[J]. 中国煤炭, 2019, 45(12): 32-36.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming. Continuously promoting the coal mine intellectualization and the high-quality development of China's coal industry[J]. China Coal, 2019, 45(12): 32-36.
- [4] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G 和网络硬切片技术[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 1-6.
SUN Jiping. Coal mine intelligence, mine 5G and network hard slicing technology [J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(8): 1-6.
- [5] 陈开岩,周福宝,夏同强,等. 基于空气状态参数与风量耦合迭代的风网解算方法[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 613-623.
CHEN Kaiyan, ZHOU Fubao, XIA Tongqiang, et al. Ventilation network solution method based on coupling iteration of air state parameters and air quantity[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 613-623.
- [6] 赵跃民,张亚东,周恩会,等. 清洁高效干法选煤研究进展与展望[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(3): 607-616.
ZHAO Yuemin, ZHANG Yadong, ZHOU Enhui, et al. Research progress and prospect of clean and efficient dry coal separation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(3): 607-616.
- [7] 孙健东,张瑞新,白润才,等. 智能化露天矿的核心概念与建设战略[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(1): 23-33.
SUN Jiandong, ZHANG Ruixin, BAI Runcai, et al. The key concepts and enstruction strategy of intelligent surface mines[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(1): 23-33.
- [8] ELDEEB H B, NASER S, BARIAH L, et al. A review of intelligent unmanned mining current situation and development trend [J]. Energies, 2023, 15(2): 513.
- [9] WANG G F, REN H W, ZHAO G R, et al. Research and practice of intelligent coal mine technology systems in China [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(1): 24.
- [10] 王翀,魏立科,张冬阳,等. 煤矿智能化建设目标和总体框架的研究与设计[J]. 中国煤炭, 2020, 46(4): 26-31.
WANG Chong, WEI Like, ZHANG Dongyang, et al. Study and design of overall framework of coal mine intelligent construction[J]. China Coal, 2020, 46(4): 26-31.
- [11] 李首滨. 智能化开采研究进展与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 102-110.
LI Shoubin. Progress and development trend of intelligent mining technology [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 102-110.
- [12] 周莉娟,陈光柱,罗成名. 采煤工作面无线传感器网络的无线通信信道建模[J]. 传感技术学报, 2010, 23(5): 722-726.
ZHOU Lijuan, CHEN Guangzhu, LUO Chengming. Wireless channel modeling in underground coal face wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(5): 722-726.
- [13] 阎玮. 矿井无线通信信道的分析与研究[J]. 山西焦煤科技, 2008, 2: 43-46.
YAN Wei. Analysis and research on wireless communication channel in mine[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technolog, 2008, 2: 43-46.
- [14] 郑红党,徐钊,聂小燕,等. 煤矿井下 MIMO 信道模型的研究[J]. 工矿自动化, 2009, 35(8): 45-49.
ZHENG Hongdang, XU Zhao, NIE Xiaoyan, et al. Research of MIMO channels model in coal mine un-

- derground[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(8): 45-49.
- [15] HANCKE G P, SILVA B J. Wireless positioning in underground mines: Challenges and recent advances[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2021, 15(3): 39-48.
- [16] FOROOSHANI A E, BASHIR S, MICHELSON D G, et al. A survey of wireless communications and propagation modeling in underground mines[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4): 1524-1545.
- [17] 彭 霞. 矿井电磁波辐射能量对瓦斯安全性的影响[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 542-547.
PENG Xia. Electromagnetic wave radiation energy influences on safety of gas in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 542-547.
- [18] 常 琳, 郑慧莹, 李 鸣. 煤矿 5G 通信系统的安全性研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(8): 137-141.
CHANG Lin, ZHENG Huiying, LI Ming. Research on safety of 5G communication system in coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(8): 137-141.
- [19] 孙继平. 煤矿智能化与矿用 5G[J]. 工矿自动化, 2020, 46(8): 1-7.
SUN Jiping. Coal mine intelligence and mine used 5G[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(8): 1-7.
- [20] 霍振龙. 矿井无线通信系统现状与发展趋势[J]. 工矿自动化, 2022, 48(6): 1-5.
HUO Zhenlong. Current situation and development trend of mine wireless communication system [J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(6): 1-5.
- [21] 周儒雅, 唐万恺, 李 潇, 等. 基于可重构智能表面的移动通信简要综述[J]. 移动通信, 2020, 44(6): 63-69.
ZHOU Ruya, TANG Wankai, LI Xiao, et al. A brief survey of mobile communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. Mobile Communications, 2020, 44(6): 63-69.
- [22] HUANG C, MO R, YUEN C. Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1839-1850.
- [23] GUO T, LI X, MEI M, et al. Joint communication and sensing design in coal mine safety monitoring: 3-D phase beamforming for RIS-assisted wireless networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(13): 11306-11315.
- [24] GUO T, WANG Y, XU L, et al. Joint communication and sensing design for multi-hop RISs-aided communication systems in underground coal mines [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023, 10(22): 19533-19544.
- [25] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e218.
- [26] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(15): 3644-3668.
- [27] WU Q, ZHANG S, ZHENG B, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(5): 3313-3351.
- [28] 孙继平, 徐 卿. 矿井无线中继应急通信系统实现方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 1-8.
SUN Jiping, XU Qing. Implementation method of mine wireless relay emergency communication system[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(5): 1-8.
- [29] BJÖRNSON E, ÖZDOĞAN Ö, LARSSON E G. Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions [J]. IEEE Communications Magazine, 2020, 58(12): 90-96.
- [30] 赵世萍, 孙秀玲, 阚晓婷. 井下煤尘浓度和湿度对电磁波传输的影响研究[J]. 工矿自动化, 2018, 44(11): 37-41.
ZHAO Shiping, SUN Xiuling, KAN Xiaoting. Research on influence of underground coal dust concentration and humidity on electromagnetic waves transmission[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(11): 37-41.
- [31] 5G+煤矿智能化白皮书(2020 版)[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2020: 1-11.
5G + Intelligent coal mine white paper (2020 Edition) [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2020: 1-11.
- [32] 5G+煤矿智能化白皮书(2021 版)[R]. 北京: 中国煤炭工业协会, 2021: 1-52.
5G + Intelligent coal mine white paper (2021 Edition) [R]. Beijing: China Coal Industry Association, 2021: 1-52.
- [33] 孙继平. 煤矿事故特点与煤矿通信、人员定位及监视新技术[J]. 工矿自动化, 2015, 41(2): 1-5.
SUN Jiping. Characteristics of coal mine accidents and new technologies of coal mine communication, personnel positioning and monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(2): 1-5.

- [34] LU H, ZENG Y, JIN S, et al. Aerial intelligent reflecting surface: Joint placement and passive beamforming design with 3D beam flattening[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4128-4143.
- [35] DIRENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2450-2525.
- [36] ABEYWICKRAMA S, ZHANG R, WU Q, et al. Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5849-5863.
- [37] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Rayleigh fading modeling and channel hardening for reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(4): 830-834.
- [38] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [39] WANG J, WANG H, HAN Y, et al. Joint transmit beamforming and phase shift design for reconfigurable intelligent surface assisted MIMO systems[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2021, 7(2): 354-368.
- [40] TANG W, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(2): 180-187.
- [41] ZHOU R, CHEN X, TANG W, et al. Modeling and measurements for multi-path mitigation with reconfigurable intelligent surfaces[C]//2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). 2022: 1-5.
- [42] TANG W, CHEN M Z, CHEN X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 421-439.
- [43] XIONG B, ZHANG Z, JIANG H, et al. A statistical MIMO channel model for reconfigurable intelligent surface assisted wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(2): 1360-1375.
- [44] HUANG Y. *Antennas: From theory to practice* [M]. Second edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021.
- [45] BALANIS C A. *Antenna theory: Analysis and design*[M]. Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016.
- [46] POON A S Y, BRODERSEN R W, TSE D N C. Degrees of freedom in multiple-antenna channels: A signal space approach[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2005, 51(2): 523-536.
- [47] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design[C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2018: 1-6.
- [48] YING K, GAO Z, LYU S, et al. GMD-based hybrid beamforming for large reconfigurable intelligent surface assisted millimeter-wave massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 19530-19539.
- [49] XIU Y, ZHAO J, SUN W, et al. Reconfigurable intelligent surfaces aided mmWave NOMA: Joint power allocation, phase shifts, and hybrid beamforming optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 8393-8409.
- [50] HUANG C, ALEXANDROPOULOS G C, YUEN C, et al. Indoor signal focusing with deep learning designed reconfigurable intelligent surfaces[C]//2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). 2019: 1-5.
- [51] FAISAL A, AL-NAHHAL I, DOBRE O A, et al. Deep Reinforcement learning for RIS-assisted FD systems: Single or distributed RIS? [J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(7): 1563-1567.
- [52] ZHANG S, ZHANG S, GAO F, et al. Deep learning-based RIS channel extrapolation with element-grouping[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(12): 2644-2648.