

智能超表面使能无人机高效通信 信道建模与传输机理分析

张在琛^{1,2,3}, 江浩^{1,4}

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 东南大学教育部移动信息通信与安全前沿科学中心, 江苏南京 210096; 3. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏南京 211111; 4. 南京信息工程大学人工智能学院, 江苏南京 210044)

摘要: 智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为第六代(Sixth Generation, 6G)移动通信中的潜在关键技术之一, 具有低成本、低能耗和易于部署等特点. 通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号, 可以实现对入射信号的幅度、相位、极化等调控, 从而构造智能化的通信环境, 为终端高效无线通信提供了契机. 本文首先基于无人机通信技术发展现状, 阐明了将RIS技术引入无人机通信系统的必要性; 然后, 分析了RIS使能无人机高效通信信道的传输机理, 归纳了信道建模关键技术; 最后针对RIS使能无人机高效通信信道建模, 总结和展望了未来的技术挑战与研究方向.

关键词: 第六代移动通信; 智能超表面技术; 高效通信; 无人机通信; 信道传输机理

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(No.2242022k60001); 国家自然科学基金(No.61960206005, No.62101275); 江苏省自然科学基金(No.BK20200820)

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)10-2623-12

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221352

Channel Modeling and Characteristics Analysis for High Energy-Efficient RIS-Assisted UAV Communications

ZHANG Zai-chen^{1,2,3}, JIANG Hao^{1,4}

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Frontiers Science Center for Mobile Information Communication and Security, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. Purple Mountain Laboratories, Nanjing, Jiangsu 211111, China;

4. College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) is one of the potential key technologies for sixth generation (6G) communications, which has the characteristics of low cost, low complexity, and easy deployment. By applying control signals to adjustable elements on the electromagnetic unit, it has the ability to adjusting the wireless communication environments, which provides a new opportunity to improve the high energy-efficiency performance of wireless communication systems. This paper provides a comprehensive overview of channel modeling and characteristics analysis for RIS-assisted unmanned aerial vehicle (UAV) high energy-efficiency communications. Firstly, based on the research basis of the UAV communications technologies, we clarify the necessities of introducing the RIS into UAV communications. Then, we summarize the key technologies for channel modeling and characteristics analysis for RIS-assisted UAV communications. Finally, we point out some future research directions in RIS-assisted UAV channel modeling and characteristics analysis.

Key words: sixth generation communications; reconfigurable intelligent surface; high energy-efficient communications; unmanned aerial vehicle communications; channel propagation characteristics

Foundation Item(s): Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022k60001); National Natural Science Foundation of China (No.61960206005, No.62101275); Jiangsu NSF Project (No.BK20200820)

1 引言

工业和信息化部印发的《“十四五”信息通信行业发展规划》指出,要推进第六代(Sixth Generation, 6G)移动通信核心技术攻关,构建空天地海一体化信息网络. 无人机通信作为空天地海一体化信息网络中的重要组成部分,具有成本低廉、操作简单、配置灵活、携带轻便等特点,对构建6G“空天地海”全球立体深度覆盖无线网络具有重要意义. 在军事领域中,无人机可用于边境巡逻、昼夜空中侦查、目标定位、战场监视、军事打击等;在民用领域中,无人机可用于摄影航拍、地球物理勘探、农业植保、作为应急通信中的空中基站等. 近年来,无人机正朝着标准化、多样化、系列化的方向不断发展^[1]. 因此,面向无人机通信开展物理层基础理论研究,突破制约无人机通信系统设计与性能评估过程中的关键技术瓶颈,对推进6G核心技术攻关、构建空天地海一体化信息网络,具有重要的理论价值和现实意义^[2].

在早期无人机通信系统的研发与设计,通过引入大规模天线阵列(Massive Multiple Input Multiple Output, Massive MIMO)技术,能够有效增强网络覆盖能力和数据传输性能. 然而,大规模天线阵列技术面临网络复杂度过高、硬件成本开销大以及能耗高等挑战. 传统无人机通信场景中,发射机和接收机之间的无线传输环境不可控制,需要设计算法适应环境. 研究表明,信号衰减限制了无线信号的传输距离;信号反射、绕射、折射等传输机制引起的多径效应造成信号衰落现象. 这些因素对通信性能造成负面影响,降低了服务质量. 因此,研究高能效的无人机通信网络解决方法势在必行. 近年来,智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)技术作为一项低成本、低能耗的6G使能技术,可广泛部署于无线通信环境中,通过对入射信号进行幅度、相位、极化等调控,构造智能化传输环境,增强通信性能. 具体来说,当收发机之间的视距传输链路(Line of Sight, LoS)被树木或建筑物等遮挡时,通过在收发端之间部署RIS从而构造收发端之间的虚拟直达径传输链路,弥补视距链路被阻挡时通信性能下降明显的问题. 因此,RIS可通过应用于无人机通信网络中,构建智能化的无人机通信环境,对克服非视距传输、提升信号覆盖范围、服务边缘用户、增强通信安全、促进感知定位等应用场景具有重要意义^[3,4].

在RIS使能无人机通信中,无论是小尺度衰落信道中的信道编码,或是大尺度衰落信道中的网络优化,信道模型在系统设计、算法验证、性能评估、系统优化及部署中始终能够成为重要的基础^[5]. 现有不少的研究工作探索了RIS使能无线通信信道建模理论. 例如,文

献[6]强调了RIS在未来无线通信网络中的应用,并提出采用仿真软件与软件平台相结合的方式探索信道传输机理. 文献[7]比较了单RIS和多RIS使能无线通信系统的性能,并且分别对这两种通信信道建模理论展开了研究. 文献[8]对RIS使能多频段、多场景无线通信信道建模进行了分析研究,探索了信道在空域、时域和频域上的建模手段. 无人机通信是未来空天地海一体化信息网络中的重要组成部分,针对RIS使能无人机通信场景开展物理层信道建模理论与传输机理的研究,将会成为6G通信的一大研究热点. 现今并不存在有文献针对RIS使能无人机通信信道建模理论展开系统的分析与研究,因此无人机通信信道中的独特特性,例如无人机的动态特性等,对信道的空时频域非平稳特性造成的影响仍然没有得到详细的讨论与分析,这也给相关领域的系统设计与性能分析带来了困难. 本文基于无人机通信研究现状,阐明了将RIS技术引入无人机通信系统使能性能增强的必要性,并给出了RIS使能无人机高能效无线通信系统模型;然后,阐明了将RIS技术引入无人机通信系统使能性能增强的必要性,并给出了RIS使能无人机高能效通信信道特性,包括高能效通信信道特性分析、无人机的三维不规则运动轨迹影响、RIS物理属性影响、近场与远场传输效应等;接着,阐述了RIS使能无人机高能效通信系统与建模方法;最后,讨论了RIS使能无人机信道建模未来挑战与方向,包括如何刻画气象因素影响、标准化统一信道建模理论、RIS使能无人机宽频谱高能效通信信道模型以及相应的模型性能评估方法.

2 RIS使能无人机高能效通信需求与信道特性

2.1 无人机多元化通信场景

根据基础设施建设的地点、资源和环境组成,未来无人机无线通信可分为空-空(无人机-无人机)通信、空-地(无人机-地面移动端)通信以及空海协同无人机通信^[9],如图1所示. 针对不同的无人机通信场景,其传输机制和特性具有显著差异. 各种场景的传输机理如下所示:

(1)在无人机-无人机通信场景中,发射机和接收机之间主要依赖视距链路完成数据传输. 因此,在建立无人机-无人机信道模型时,需要综合考虑高空传播的路径损耗,大气中的水汽、氧气和水滴等物质吸收对电磁波信号产生的强烈的衰弱以及多径效应和大气湍流引起的随机衰落. 此外,由于无人机在三维空间中以时变的运动速度不规则运动,在分析无人机-无人机无线通信信道传输机理时,需要分析发射机/接收机

的随机运动轨迹和时变运动速度对信号传输机理造成的影响。

(2)在空地通信场景中,信号传输主要由视距传输路径和建筑物反射等引起的非视距传输路径组成.因此,在建立空地无线信道模型时,需要结合实验测量数据描述散射体的分布,分析不同参数配置下的空地协同无人机通信信道传输机理。

(3)在空海协同无人机通信场景中,信号传播主要受远通信距离、海浪运动、海面蒸发波导和海面曲度等海洋特殊地理水文环境的影响^[10].此外,因海面通信节点分布稀疏造成的海面散射体的稀疏性,以及节点因海面运动所造成的信道时变非平稳性,均会成为影响空海协同无人机通信信道传输机理的重要因素^[11]。

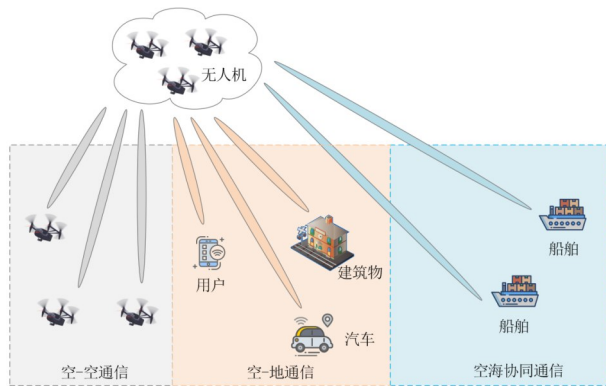


图1 无人机通信场景示意图

2.2 RIS使能的无人机高效通信必要性

在无人机与用户之间的传输环境中,由于信号在空间内的自然扩散会产生衰减和散射,用户恢复信号的计算复杂度呈指数上升,造成系统性能急剧下降.为解决这一难题,需要通过优化无人机-用户无线通信算法,无限逼近自然传播信道约束下的信道容量上限.此外,无人机信道的大尺度与小尺度信道参数具有随机性,无法避免信道估计偏差.因此,无论链路自适应还是波束赋形均会存在信道匹配偏差,造成实际可达容量与理想信道容量存在差距。

一直以来,人们都迫切希望能够随心所欲地调控电磁波的传输机理.自19世纪麦克斯韦方程组的出

现,研发人员对电磁波的掌控能力得到了飞速增长,但受限于天然材料相对固定的电磁参数,人们对电磁波的控制力仅局限在发射机和接收机上.近年来,RIS因其能够灵活操控信道环境中的电磁特性,吸引了学界和工业界广泛的关注.RIS通过控制变容二极管、PIN开关、MEMS开关、液晶、石墨烯等电子器件的偏置电压,实现对入射电磁波的幅值、相位、极化等参数的调控并构造智能化传输环境,确保无线环境有利于信号的传输,提升通信系统性能.相较于中继等一些传统的通信技术,RIS的硬件成本更低、更易部署,能够非常灵活地部署在无人机表面、建筑物外部、楼宇之间等.此外,RIS是由一些近似无源的反射元器件组成,对于传送过来的信号只是进行反射处理,避免了热噪声的引入,从而在很大程度上降低了能量损耗.因此,将RIS技术应用于无人机通信网络中,能够帮助解决高频段电磁波覆盖范围小的问题,实现更低成本与更高质量的通信覆盖;与此同时,RIS使能无人机无线通信环境构建确保了通信系统具有更多的可控维度,对6G空天地海一体化无线通信网络的建设具有着重要意义。

2.3 RIS使能无人机信道特性分析

2.3.1 RIS使能无人机高效通信信道特性分析

相对于地面终端,无人机的三维运动轨迹具有不确定性,且其运动速度具有时变性,因此在探索无人机信道传输机理时需要分析其时域非平稳特性.此外,还需要分析无人机的机架阴影衰落以及距离路面高度对无人机信道传输机理造成的影响.在不同频段的RIS使能无人机高效通信场景中,其信道传输机理区别明显.表1列举了无人机信道在不同频段的传输机理.因此,在RIS使能无人机高效通信系统设计与性能分析中,应当深入分析RIS通信信道特性,包括空时频相关特性、时延扩展特性、多普勒功率谱密度、角度扩展特性、互易性等.在RIS使能无人机高效通信信道中,收发端部署大规模天线阵列会引起的信道空域非平稳特性,发射机/接收机/散射簇的快速运动会引起的信道时域非平稳特性,以及引入更大系统传输带宽引起的信道频域非平稳特性,值得注意。

表1 无人机信道在不同频段的传输机理

频段	信道特性
分米/厘米波段	直射、反射和绕射能力强、传波损耗小、穿透损耗小、穿透能力弱、支持广覆盖、宽带有限
毫米波段	主要靠直射和反射、绕射能力弱、穿透损耗大、支持大容量、雷达测距等
太赫兹波段	易受大气影响、路径损耗严重、支持高分辨率成像和环境感知
光波段	可用带宽大、方向性强、保密性好、支持短距离大容量、各种光源带来干扰

2.3.2 无人机的动态特性对信道传输机理造成的影响

无人机处于高速和低速通信场景中进行信道建模方法会有明显的区别^[12]. 准确来说,在无人机低速运动场景中,信道传输机理并不会随着运动时间而发生改变,即信道呈现时域平稳特性. 而当无人机处于高速运动场景中时,无人机的动态特性,例如无人机的多域三维运动、环境动态切换等,会对无人机信道造成时域非平稳特性. 此外,无人机的运动轨迹存在不规则性,且运动速度具有时变特性. 因此,在研究 RIS 使能无人机通信信道传输机理时,应当分析无人机的随机运动轨迹和时变运动速度对信道传输机理造成的影响. 在图 2 所示的非平稳无人机通信场景中,当无人机从位置 P_1 运动至位置 P_2 ,或者用户从位置 P_3 运动至位置 P_4 时,使得信道角度参数(包括离开角度和到达角度)和传输路径长度在不同时间节点具有不同的函数值. 因此,通过确定角度参数和传输路径长度在运动初始时刻的函数值,引入无人机的运动速度、运动方向和运动时间,结合发射机、接收机和散射簇之间的几何关系,推导在运动阶段的时变角度参数函数表达式和时变路径长度函数表达式^[13]. 基于无人机自身的动态属性(例如无人机的三维旋转、机身抖动、机身姿态、遮挡阴影等)与无人机信道时域非平稳特性之间的非线性关系,建立无人机时变信道矩阵,探索无人机的高速动态特性对信道时域非平稳特性造成的影响,对评估高速无人机通信系统性能具有重要的理论意义和现实价值.

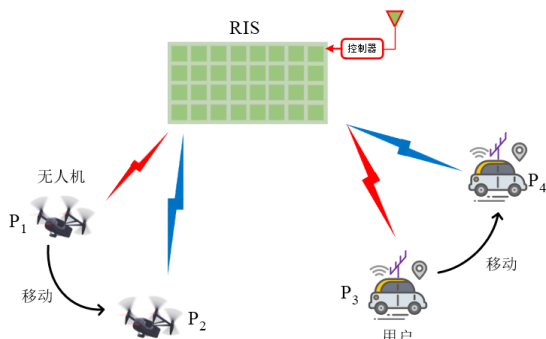


图2 无人机的运动特性示意图

图 3 为仿真无人机运动速度/方向对无人机通信信道时域自相关特性造成的影响. 结果显示,当无人机和用户处于不同运动时间时,传输路径的时域自相关特性不断地发生改变,表明信道在时域具有非平稳特性. 当无人机的运动速度 v_{UAV} 从 5 m/s 增大至 10 m/s 时,信道的时域自相关性随时间间隔的增大而出现明显的下降趋势. 此外,当无人机的运动方向发生改变时,信道特性也会随之发生改变.

此外,在已部署 RIS 的智能通信环境中,当无人机

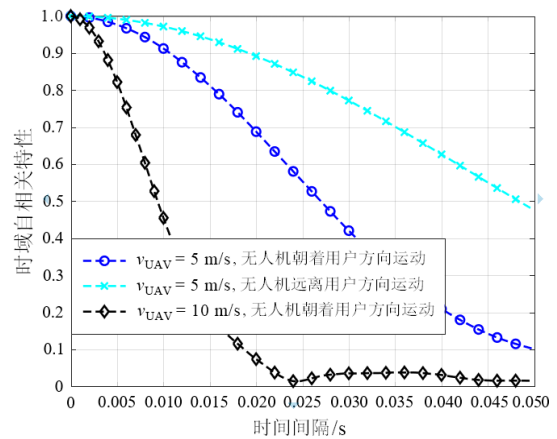


图3 无人机的运动速度/方向对信道时域自相关特性造成的影响

与用户之间的视距通信链路被阻挡时,可以利用 RIS 构造的虚拟直达径链路使能增强无人机和用户之间的通信性能. 然而,在面向 6G 无人机通信网络时,通信终端表现出高动态特性,即通信终端位置会随着时间的变化而改变. 这会进一步造成网络拓扑发生变化,因此无人机和用户之间的通信环境发生改变. 在如图 4 所示的无人机对地面用户通信场景,当地面用户处于位置 P_1 时,无人机和用户之间的视距传输路径被阻挡,为了保障无人机和地面用户之间的稳定通信,可以利用 RIS 构造无人机和地面用户之间的虚拟直达径进行通信. 在地面用户从位置 P_1 先后经过位置 P_2 和 P_3 运动到位置 P_4 过程中,无人机和地面用户之间的通信环境不断发生变化,一个显著的特征是在位置 P_2 和 P_4 处,无人机和地面用户之间的视距传输路径重新出现,而在位置 P_3 处无人机和地面用户之间的 LoS 链路又重新被阻挡. 通信环境的剧烈变化会影响信道传输机理和系统性能. 当无人机和地面用户之间的 LoS 链路表现出交替出现-消失特性时,需要设计发射端传输策略以实现更优的通信性能.

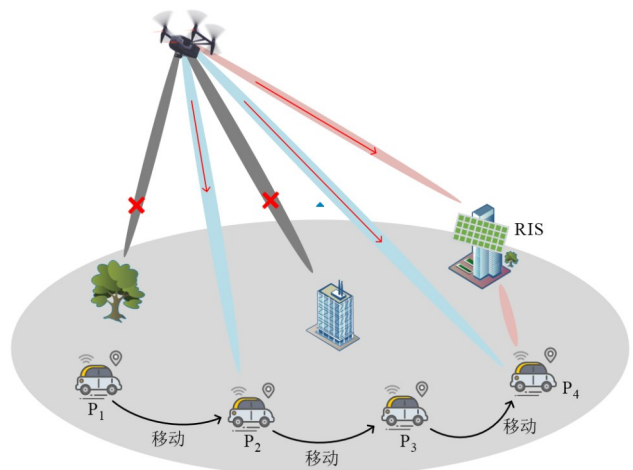


图4 RIS 使能无人机动态通信场景示意图

2.3.3 RIS 物理属性对信道特性造成的影响

与传统的无人机通信信道特性分析理论相比, RIS 使能无人机高效通信信道特性理论应当考虑 RIS 的物理属性会对其造成的影响. 如图 5 所示, RIS 的物理属性涉及 RIS 朝向偏转角(如图 5(a)中的 RIS 水平方位偏转角 ϵ_{RIS} 和垂直方位偏转角 θ_{RIS})、几何位置(如图 5(b)中的 RIS 几何坐标 $(x_{\text{RIS}}, y_{\text{RIS}}, z_{\text{RIS}})$)、阵列单元尺寸(如图 5(c)中的 RIS 阵元的水平尺寸 d_M 和垂直尺寸 d_N)、元素数目(如图 5(d)中的 RIS 水平方位阵元数目 M 和垂直方位阵元数目 N)、阵列形状(如图 5(e)所示)、透射系数、编码方式、极化特性等. 在现有的研究中,大都设定 RIS 面板的反射系数 $\chi_{m,n}(t)$ 为 1, 并且具有非常精确的连续调相能力. 然而, RIS 面板的设计与加工水平

有限, 导致 RIS 在使能无人机通信中展现出的电磁特性与理论值存在明显的差异. 在 RIS 面板的实际制作中, 无人机发出的电磁波信号在经过 RIS 作用时会存在一定的损耗, 相位也只能以有限比特位数编码实现离散调控. 因此, 在探索 RIS 使能无人机通信信道特性时, 通过推导 RIS 使能无人机通信信道复冲激响应函数表达式, 建立具有 RIS 单元幅度/相移调控精度、插损、极化等实际特性的 RIS 使能无人机通信信道模型, 分析大尺度衰落信道特性(路径损耗与阴影衰落)和小尺度衰落信道特性(多径效应、时延扩展与角度扩展、多普勒功率谱、相关性), 揭示 RIS 的物理属性对信道传输机理造成的影响, 能够为系统设计过程中参数权衡选取提供理论支撑.

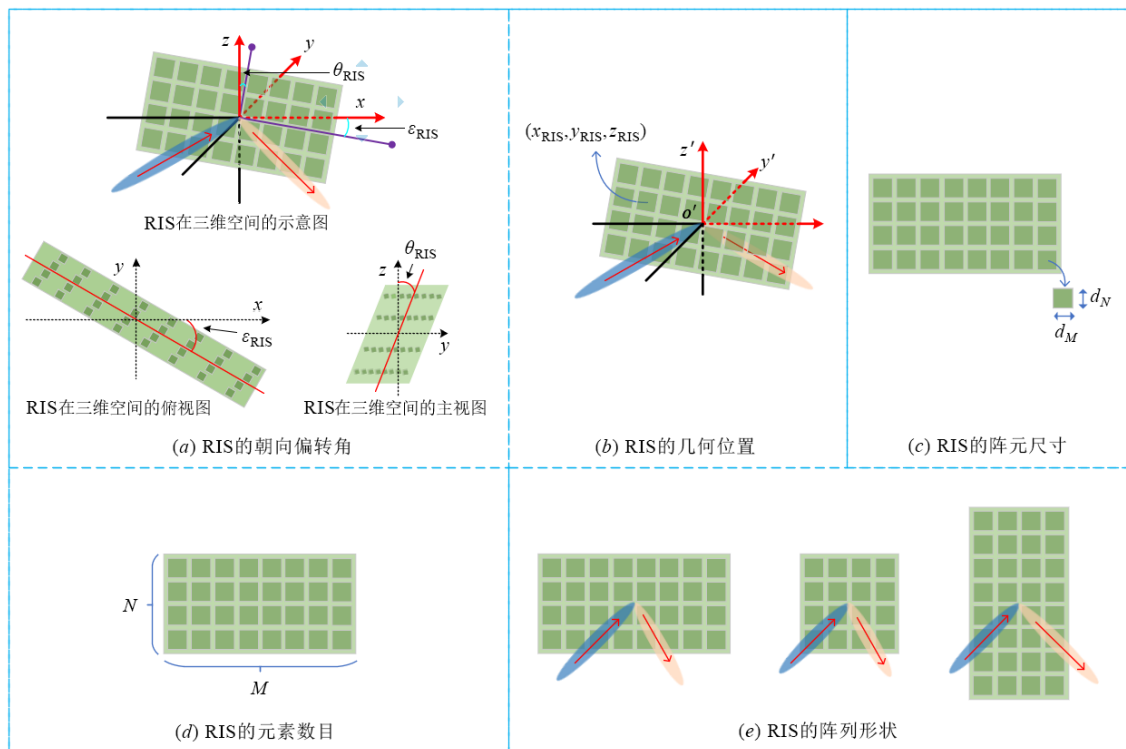


图5 RIS 物理属性示意图

图 6 展示了不同 RIS 物理参数对 RIS 使能无人机信道频域相关特性造成的影响. 结果显示, 频域相关特性伴随频率间隔的增大而不断地减小^[13]. 当 RIS 垂直面板距离水平面的高度确定不变时, 随着 RIS 的水平方位倾斜角 ϵ_{RIS} 发生改变, RIS 使能无人机信道的频域相关特性也会不断发生变化. 此外, 当 RIS 阵列高度发生改变时, 信道的频域相关特性也会发生变化. 准确来说, 而当 RIS 水平方位倾斜角 ϵ_{RIS} 固定不变时, 随着垂直 RIS 面板距离水平面的高度发生改变, RIS 使能无人机信道的频域相关特性也会发生变化. 上述理论研究结果能够应用到新一代 RIS 使能无人机通信系统的设计

中, 具有重要的研究价值.

2.3.4 近场与远场传输效应

在 RIS 使能无人机通信场景中, 当 RIS 和无人机/用户之间的传输距离较大, 例如距离大于瑞利距离 $2D^2/\lambda$ 时(其中 D 表示无人机/用户天线或者 RIS 阵列的数目, λ 为波长), 采用基于远场假设的平面波模型分析信道的统计特性, 例如空间互相关函数、时域自相关函数、频域相关性函数、时延扩展、角度扩展、多普勒功率谱密度、平稳间隔等. 如图 7(a)所示, 在远场假设下, 认为无人机发出的信号到达 RIS 阵列不同元素是具有相同的信号角度参数. 而当 RIS 阵列的元素数目较大时, 阵

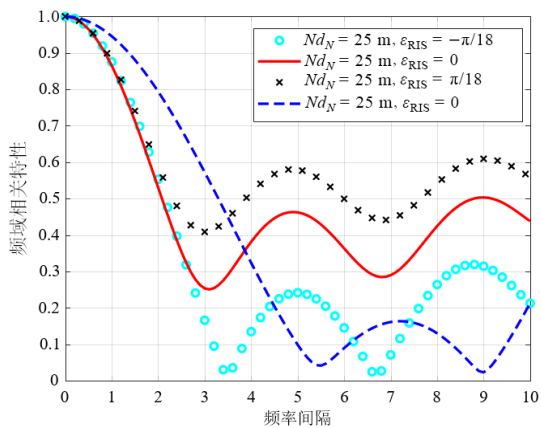


图6 RIS竖直面板高度和水平倾斜角对RIS使能无人机通信信道频域相关特性造成的影响

列瑞利距离相应增加并大于无人机/用户到RIS阵列的传输距离时,远场假设不再成立,此时需要考虑近场传输效应并基于近场球面波模型分析信道传输机理.如图7(b)所示,在近场传输场景下,信号到达RIS阵列不同元素时具有不同的信号角度参数.如图8所示,在面向6G的RIS使能无人机通信场景中,由于RIS阵列尺度较大且无人机表现出高动态特性,部署在不同位置的RIS阵列表现出不同的传输机理,即部分RIS阵列满足远场传输的假设,而另一部分RIS阵列不满足远场近似且需要采用近场传输假设.

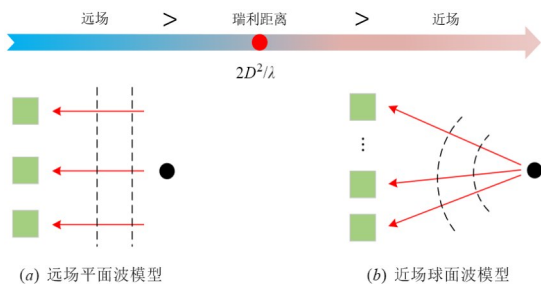


图7 无人机通信在近场和远场环境的示意图

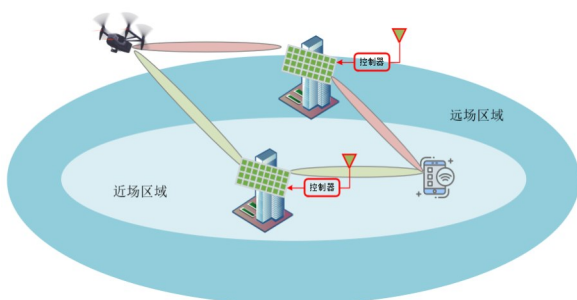


图8 无人机通信在近场和远场环境的示意图

现今国内外诸多的研究者针对RIS使能无线通信特性展开了分析.例如,针对近场传输的RIS使能无线通信场景,文献[14]和文献[15]分别采用平面波和球

面波的假设分析了不同模型参数对信道空域、时域和频域相关特性造成的影响.前者分析方法虽然能够缓解算法分析的计算复杂度,降低仿真时间,但其仿真结果与实测数据仍然存在较大误差.相反,虽然后者分析方法能够准确地揭示信道特性,但是需要消耗比较长的仿真时间.因此,当RIS使能无人机通信在近场传输的场景中,通过将RIS阵列划分为多个小尺寸子阵列,即图9中的红色区域、紫色区域、蓝色区域以及绿色区域,能够保证平面波近似应用于各个子阵列中信道参数的求解.因此,通过建立局部子阵列远场平面波,全局阵列近场球面波的框架模型,能够实现高计算复杂度近场球面波传输机理分析理论到低计算复杂度远场平面波传输机理分析理论的等效映射和切换,揭示RIS使能无人机信道的统计特性与通信频段、通信场景以及系统配置间的非线性关系.

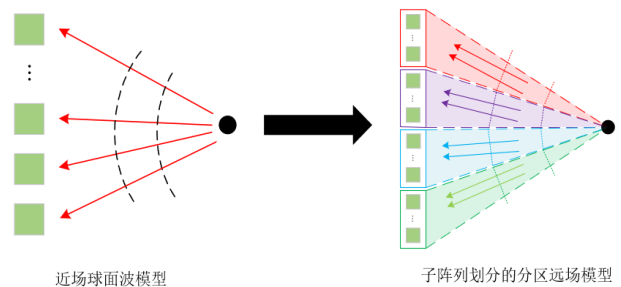


图9 无人机通信在近场球面波模型和子阵列划分的分区远场模型中的传输示意图

3 RIS使能无人机高效通信系统与建模方法

3.1 RIS使能无人机高效通信系统模型

基于RIS阵列的设计原理,RIS使能无人机通信模式可以划分为反射、透射,以及反射与透射并存3种模式.其中,反射模式是指无人机和用户处于RIS同侧,此时来自无人机的信号通过RIS反射到达接收端用户;透射模式是指无人机和用户处于RIS不同侧,此时来自无人机的信号通过RIS透射到达接收端用户;反射与透射并存模式主要应用于多用户无人机通信场景,此时来自无人机的信号部分通过反射服务位于RIS同侧的用户,另一部分信号通过透射服务位于RIS异侧的用户.RIS由于能够配置成不同的信息传输模式,因此被广泛应用于高空无人机-无人机通信、空地协同无人机通信以及空海协同无人机通信等各种场景中.目前的研究主要关注反射式RIS的信道特性,而对其他模式的RIS信道特性研究较少.因此,本文接下来主要讨论反射式RIS使能无人机高效通信场景的信道建模与特性分析.

在图 10 所示的无人机-地面用户通信场景中,无人机和用户分别设置为 P 根和 Q 根 MIMO 天线阵列. 当无人机和用户间的直达路径被建筑物遮挡时,通过将 RIS 垂直布置于建筑物表面辅助无人机与用户间的信息传输. 此外,定义 RIS 水平轴方向和垂直轴方向分别布置有 M 个和 N 个单位阵元. 假设无人机与用户之间的 LoS 链路被障碍物遮挡导致通信性能下降明显,通过在建筑物表面部署 RIS 构造无人机和用户之间的虚拟直达径传输链路,有效提高通信性能. 在此信道模型中,无人机发出的信号部分入射到 RIS 表面,在受到 RIS 调控作用之后传输到达用户;还有部分信号经过散射簇反射到达用户. 文献[16]对 MIMO 信道建模理论进行了全面的分析,指出通过推导信道矩阵能够描述信道的物理属性. 假设图 10 中的两种传输路径相互独立,则用户接收到的信号表示为

$$\mathbf{y}(t) = \sqrt{\alpha} \left(\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t) + \mathbf{H}_{T,R}^{\text{簇}}(t) \right) \mathbf{s} + \mathbf{n}(t)$$

其中, α 表示路径增益, t 为无人机/用户的运动时间, \mathbf{s} 为无人机发送信号向量, $\mathbf{n}(t)$ 为高斯白噪声. $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{簇}}(t)$ 为无人机发出的信号经散射簇反射到达用户的复信道矩阵, $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t)$ 表示无人机发出的信号经 RIS 作用到达用户的复信道矩阵. 基于上述公式可知,建立好的信道矩阵,能够有效地用来分析与设计无线通信系统. 在现有研究中,关于信道矩阵 $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{簇}}(t)$ 的描述已有较多研究成果,本文在接下来主要聚焦对信道矩阵 $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t)$ 进行建模分析. 文献[17]对现有 RIS 使能物理层无线通信信道建模方法进行了全面总结,指出主要分为级联信道建模方法和空间散射信道建模方法. 本文在接下来对这两种建模方法进行阐述.

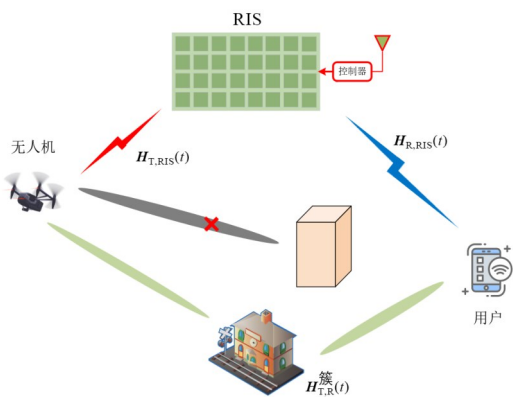


图 10 RIS 使能无人机通信场景示意图

(1) 级联信道建模方法

在现有的 RIS 使能无线通信信道建模研究中,级联信道建模方法最为常见. 准确来说,通过级联 RIS 与用户间子信道 $\mathbf{H}_{RIS,R}(t)$, RIS 的可调相移对角矩阵 $\Phi(t)$ 以及无人机与 RIS 间子信道 $\mathbf{H}_{T,RIS}(t)$, 信道矩阵 $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t)$ 可

以建模为

$$\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t) = \mathbf{H}_{RIS,R}(t) \Phi(t) \mathbf{H}_{T,RIS}(t)$$

其中,

$$\Phi(t) = \text{diag} \left\{ \chi_{1,1}(t) e^{j\vartheta_{1,1}(t)}, \dots, \chi_{m,n}(t) e^{j\vartheta_{m,n}(t)}, \dots, \chi_{M,N}(t) e^{j\vartheta_{M,N}(t)} \right\}$$

表示 RIS 对信号的幅度和相位进行调控, $\text{diag}\{\cdot\}$ 为对角矩阵. 参数 $\chi_{m,n}(t) \in [0, 1]$ 和 $\vartheta_{m,n}(t) \in [0, 2\pi)$ 分别表示 RIS 中第 m 行 ($m=1, 2, \dots, M$) 和第 n 列 ($n=1, 2, \dots, N$) 单元的调控幅度和调控相位. 在现有文献中,研究人员通过设置不同约束条件对 $\Phi(t)$ 进行优化处理,旨在提高无线通信系统性能[18]. 此外,现有研究将 $\vartheta_{m,n}(t)$ 的调控方式分为随机相位调控和最优相位调控. 其中,随机相位调控虽然不能保证系统能够达到理想的通信性能,但是可以用来揭示不同相位调控对信道传输机理造成的影响. 而优化相位调控是通过抵消不同发射-接收单元散射路径的相位之差,从而使功率增益达到最大值,实现最优的无线通信性能[19]. 此外,在 RIS 使能无线通信系统中,调控矩阵 $\Phi(t)$ 中的调控幅度 $\chi_{m,n}(t)$ 和调控相位 $\vartheta_{m,n}(t)$ 均与 RIS 的制作材质有关,这是因为由不同材质制作的 RIS 面板对不同频段、不同入射角度的入射信号产生的实际调控效果与理想效果之间往往存在差异,进一步会使不同材质的 RIS 面板对信道传输机理产生不同影响. 例如,文献[20]通过分析 RIS 面板材料对通信信道传输特征造成的影响,揭示了不同 RIS 面板材质与信道非平稳传输机理之间的非线性关系.

(2) 空间散射信道建模方法

空间散射信道模型是将每个阵列单元单独作为反射体进行建模,则总的信道即为所有传输路径的叠加值. 因此,无人机经过 RIS 作用到达用户的信道矩阵建模为 $\mathbf{H}_{T,R}^{\text{RIS}}(t) = [h_{pq}^{\text{RIS}}(t)]_{Q \times P}$, 其中, $h_{pq}^{\text{RIS}}(t)$ 表示无人机第 p 根 ($p=1, 2, \dots, P$) 天线发出的信号经 RIS 作用到达用户第 q 根 ($q=1, 2, \dots, Q$) 天线的信道复冲激响应,建模为

$$h_{pq}^{\text{RIS}}(t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \chi_{m,n}(t) e^{j\vartheta_{m,n}(t)} \times e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (\xi_{p,(m,n)}(t) + \zeta_{q,(m,n)}(t))} \times e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (f_{\text{Doppler}}^{\text{T} \rightarrow \text{RIS}} + f_{\text{Doppler}}^{\text{R} \rightarrow \text{RIS}}) t}$$

其中, $\xi_{p,(m,n)}(t)$ 和 $\zeta_{q,(m,n)}(t)$ 分别表达无人机和用户天线阵列中点到 RIS 中第 m 行第 n 列单元的时变传输距离. 文献[14]指出,发射端/接收端到达 RIS 的时变传输距离和发射端/接收端的运动速度、方向和时间有关. 此外,发射端和接收端的运动会使 RIS 使能无人机通信信道呈现多普勒频移. 为了描述这一分量,采用 $f_{\text{Doppler}}^{\text{T} \rightarrow \text{RIS}}$ 表示无人机与 RIS 间子信道中传输链路的多普勒相移分

量, $f_{\text{Doppler}}^{\text{R} \rightarrow \text{RIS}}$ 表示接收端与 RIS 间子信道中传输链路的多普勒相移分量. 基于上述推导的信道复冲激响应函数表达式 $h_{pq}^{\text{RIS}}(t)$, 能够探索不同 RIS 传输路径的空间互相关特性、时域自相关特性、频域相关特性等.

3.2 RIS 使能无人机高效通信信道建模方法

3.2.1 基于统计特性的 RIS 使能无人机高效通信信道建模方法

信道模型主要分为确定性信道模型和随机性信道模型^[21]. 其中, 确定性信道模型基于电磁波传播理论精确地模拟波传播特性, 但其主要是针对特定的通信传播环境, 通用性较差; 而随机性信道模型则通过引入随机变量, 能够有效地描述各种参数配置下的无线通信环境, 但是这种建模方法并不能精准地描述信道传输机理, 其准确性并不理想. 射线追踪方法 (Ray-Tracing, RT) 作为一种常用的确定性信道建模方法, 主要基于几何光学和一致性绕射理论对电磁场进行计算模拟, 现有的 METIS, 3GPP 和 IMT-Advanced 等标准化信道模型也都支持基于 RT 的图谱模型. 在现有的研究中, RT 已经被广泛应用于无人机通信信道特性的分析中. 例如, 文献[22]基于 RT 建立了三维空间毫米波无人机信道模型, 分析了时延分布、时延扩展、角度分布和角度扩展等信道统计特性. 文献[23]通过确定传输路径和电磁波的场强, 提出了一种基于 RT 的空地无人机通信信道模型, 分析了障碍物的分布对 LoS 传输路径造成的影响. 虽然基于 RT 的建模方法能够准确地描述特定环境中的多径效应, 但其成本高且耗时长, 因此难以被广泛用于各种移动通信系统设计与性能分析.

随机性信道模型因其具有良好的通用性和泛化能力而被学术界和工业界广泛采用. 准确来说, 随机信道模型是针对特定类型的通信环境, 而不是特定位置的通信场景, 这种信道模型能够借助信道参数的统计分布对无线信道进行建模, 揭示不同系统参数配置下的无线传输机理^[24]. 在现有研究中, 随机性信道模型主要分为几何随机信道模型和非几何随机信道模型. 文献[25]指出, 基于几何特性的统计信道建模方法通过引入数学模型和经典算法, 用于描述各种移动通信环境. 因此, 现今多个标准化信道模型都采用了几何随机信道建模的思想, 但模型参数采用了不同的统计描述. 通过假设散射体服从不同三维几何体分布, 如椭圆柱体、圆柱体和球体等, 将经典几何随机信道模型扩展应用于描述三维通信场景, 近年来已经逐步成为无人机信道建模的主流方法.

而在对 RIS 使能无人机高效通信信道进行建模时, 由于不能将 RIS 设备抽象为一个通信节点, 因此传统的随机性信道模型 (例如文献[11]和文献[25]) 已经不再适用于描述 RIS 使能无线通信场景. 在现今的研

究中, 学术界需要对 RIS 设备与发射机或接收机之间的信道进行建模与特性分析. 准确来说, RIS 使能无人机信道建模受发射机、接收机和 RIS 位置的影响, 系统仿真需要对 RIS 使能无人机通信进行空间建模来准确地评估系统性能. 因此, 在现有研究中, 基于几何特性的统计信道建模方法被广泛应用于 RIS 使能无人机信道传输机理的分析中. 例如, 文献[26]通过采用圆柱模型描述路面用户附近的散射环境, 分析了 RIS 使能无人机信道在不同传输时延下的统计特性. 文献[27]针对 RIS 使能无线通信场景建立了三维几何随机信道模型, 其仿真结果证实了 RIS 能够将信道分割成两个级联信道并改变信道特性.

3.2.2 多 RIS 协作使能无人机高效通信信道模型

在空地无线通信场景中, 无人机和地面用户之间的直达传输路径容易被障碍物遮挡, 影响通信质量. 为解决这一问题, 引入 RIS 技术能够为无人机和用户间的信号传输提供虚拟直达路径, 从而提升成本效率、能源效率以及频谱效率^[6,7]. 然而, 由于无人机和地面用户间的通信环境复杂多变, 无人机发出的信号即使经过单个 RIS 进行调控, 其传输路径仍可能会被障碍物阻挡从而可能出现通信链路中断的现象. 换句话说, 采用单个 RIS 并不能保证用户获得满意的通信效果. 为解决这一问题, 现有文献提出在无人机与用户之间引入多 RIS 实现多跳信号传输, 结合仿真结果验证多 RIS 相比单 RIS 能够为无线通信系统提供更优传输质量^[28]. 为了充分发挥 RIS 的效益, 通过对不同位置处的 RIS 阵列进行联合调控, 构建多 RIS 使能通信链路, 进一步增强收发端的通信性能. 以图 11 所示的双 RIS 使能无人机对地面用户通信场景为例, 无人机发出的信号一部分经发射机附近的 RIS 作用到达接收机 (详见图 11 中的蓝色传输链路), 一部分经接收机附近的 RIS 作用到达接收机 (详见图 11 中的红色传输链路), 还有一部分信号先经过发射机附近的 RIS 作用, 接着经过接收机附近的 RIS 作用到达接收机 (详见图 11 中的黄色传输链路). 此外, 还有一部分信号经散射簇反射到达接收机 (详见图 11 中的绿色传输链路). 针对上述不同类型的传输路径, 其传输路径长度、传输机理等都存在明显的区别. 为了充分描述双 RIS 使能无人机对地面用户信道传输机理, 通过推导不同传输链路的路径功率增益因子, 可以实现对信道大尺度和小尺度衰落的联合刻画, 从而更为准确地描述双 RIS 使能场景下无人机与用户间不同路径的传输机理.

图 12 仿真双 RIS 使能无人机通信场景下不同路径分量的功率增益特性随无人机运动时间的变化关系. 结果表明, 随着无人机的运动, 单跳传输分量也可以获得优于视距链路的功率增益, 表明 RIS 在解决视距传输

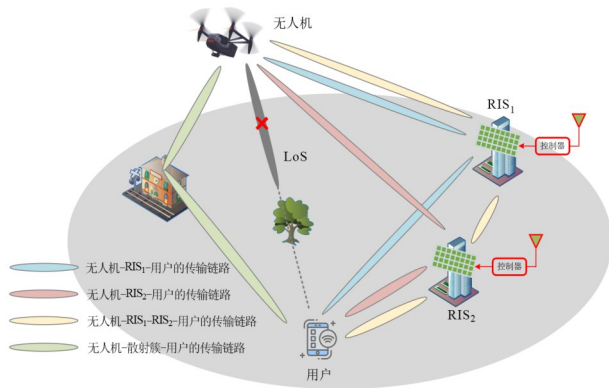


图 11 双 RIS 协作使能无人机通信场景示意图

被阻挡情况下的通信性能恶化方面具有非常巨大的潜力。在双 RIS 使能无人机通信场景中,两个 RIS 的相位调控方式对功率传递性能具有显著影响。准确来说,当无人机和用户附近的 RIS 分别采用独立的最优相位调控时,虽然单跳传输分量可以获得最优的路径功率增益性能,但只有少部分信号能量从无人机附近的 RIS 传递到用户附近的 RIS,导致双跳传输分量的功率增益近乎忽略不计。而当无人机和用户附近的 RIS 均采用联合最优相位调控时,即让入射至无人机附近 RIS 的信号能量尽可能多的反射至用户附近的 RIS 处,双跳传输分量的功率增益显著增加,在部分时刻内双跳传输分量的功率传递性能甚至优于视距链路和单跳传输分量,表明双跳传输分量增强通信性能的潜能。然而,在双跳乃至多跳 RIS 使能无人机通信场景中,RIS 的联合最优相位调控与独立最优相位调控是存在冲突的。准确来说,当采用联合最优相位调控使得双跳分量功率增益最大化时,单跳传输分量的功率增益下降明显;反之,当采用独立最优相位调控使得单跳分量功率增益最大化时,双跳传输分量的功率增益下降明显。因此,面向新一代多 RIS 使能无人机通信系统的 RIS 相位联合优化问题,仍是一个非常重要的技术挑战。设计合理的优化算法,探索单跳和多跳传输分量功率增益性能之间的折中,充分发挥多 RIS 使能无人机高效通信的性能,仍是一个值得研究的问题。

4 RIS 使能无人机高效通信信道建模未来挑战与方向

4.1 基于气象因素的 RIS 使能无人机信道建模

无人机通信受自然条件,尤其是气象因素(如云、雨、雪、雾等)的影响比较明显。降水是引起无线通信信号衰减的主要因素,尤其是对高频段的电磁波信号来说。针对不同维度的 RIS 使能无人机通信信道特性,结合跨尺度测量得到的信道数据、材质电磁参数、气象参数和传播机理模型,建立多维信道仿真误差的数学表

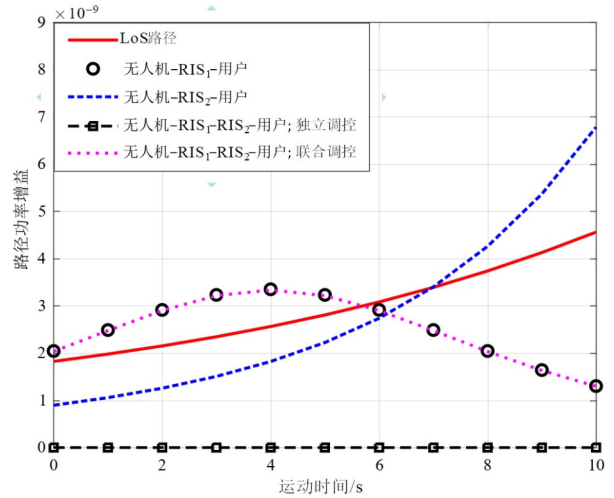


图 12 双 RIS 的调控相位对信道路径功率增益造成的影响

征。以最小化单个维度的误差为目标,分别研究不同气象场景的几何特征、材质特征、多种传播机理的叠加与信道特性之间的映射关系,并以此为约束条件,设计合理的权重与变换方法,为最小化 RIS 使能无人机通信信道的仿真误差建立联合优化目标函数,对不同气象场景的几何特征、材质参数、主要传播机理构成进行校正,建立 RIS 使能无人机通信信道数据库。

因此,探索电磁波在 RIS 使能无人机通信信道传输过程中散射、衰减特性的内在机理,并且对不同气象因素导致的信道衰减进行理论建模,是未来值得深入探索的研究方向。

4.2 RIS 使能无人机标准化统一信道模型

在未来 RIS 使能无人机通信网络的建设中,需要能够适应全频段(例如 Sub 6 GHz、毫米波、太赫兹、光频段等)、全场景(例如无人机-无人机通信、无人机-路面用户、无人机-海上船舶等)的 RIS 使能无人机通信标准化统一信道模型,为系统设计、性能分析、网络优化提供理论支撑。而在当前的研究中,国内外诸多研究者在特定频段针对 RIS 使能无人机通信展开了信道建模理论研究。例如,文献[26]提出了一种基于散射簇的统计信道模型,适用于分析毫米波频段下各种模型参数配置的 RIS 使能无人机通信信道传输机理。文献[27]提出了一种基于几何特性的统计信道模型,适用于描述 Sub 6 GHz 频段下各种模型参数配置的 RIS 使能无人机通信环境。此外,未来的无人机信道旨在支持全频段通信网络,而传统的 RIS 使能无人机通信信道模型难以描述太赫兹、光波段等高频段传输机理。因此,建立能够适应全频段通信的 RIS 使能无人机信道模型,揭示通信系统性能与信道模型参数以及信道统计特性之间的非线性映射关系,会在将来成为一个值得探索的研究方向。

此外,在现今关于无人机通信信道传输机理的研究中,大都针对特定的无人机通信场景展开建模理论研究.例如,文献[11]提出了一种三维空间双散射簇几何统计信道模型,能够适用于描述多种参数配置下的无人机-海上无人船移动通信环境.文献[29]提出了一种三维空间椭圆柱几何统计信道模型,能够有效地用来描述多参数配置下的无人机-路面用户无线通信信道传输机理.然而,面对未来复杂多变的无人机通信场景,建立能够描述各种通信环境的RIS使能无人机标准化统一信道模型,将会是一个值得探索的方向.

综上所述,现今的无人机通信信道模型只能针对特定频段、特定场景具有传输机理.如何建立RIS使能无人机标准化统一信道模型,通过调整模型参数能够有效地描述各种参数配置下的RIS使能无人机通信环境,并且揭示各种频段、场景下的统计特性,仍是一个技术挑战.

4.3 RIS使能无人机宽频谱高效通信信道模型

在RIS使能无人机通信网络中,充分挖掘时域、频域、空域等多个维度的网络资源,能够全面提升网络的传输性能.RIS使能无人机通信信道在空域、时域以及频域表现出显著的扩展效应,导致信道特性分析面临尺度跨度大、空-时-频域非平稳、建模复杂度剧增等一系列问题.值得注意的是,在空间维度上,采用大规模天线阵列可以有效提升网络的能量效率.而在频域维度上,增加频率信道数量,能够在提升传输带宽的同时提升能量效率.因此,建立宽频谱高效无线通信信道模型,能够有效地分析RIS使能无人机通信信道传输机理.但是,现有面向宽频谱高效无线通信的RIS使能无人机信道模型仍然面临诸多挑战.第一,RIS使能无人机通信网络需要在很大的传输带宽上进行通信,而宽频谱对应的信道状态信息可能存在很大差异,现有的信道模型并不能描述信道在空域、时域、频域等多个维度上的传输机理,无法估计在不同维度、不同资源节点上的信道状态.第二,宽频谱高效RIS使能无人机通信网络是联合多个资源维度的通信系统,结合未来无线通信网络高复杂性、高智能化的特点,缺少以宽频谱高效为基础的面向下一代无线通信的综合能量效率模型.第三,针对宽频谱高效RIS使能无人机通信网络的研究大都停留在理论层面,缺少结合实际信道模型和能量效率模型和以宽频谱高效理论为基础的实际通信系统.

综上所述,如何建立宽频谱高效RIS使能无人机无线通信信道模型,探索信道分析空域、时域及频域非平稳传输机理,仍是一个技术挑战.

4.4 RIS使能无人机高效通信信道模型的性能评估

针对建立的RIS使能无人机统计信道模型,需要从准确度、高效性、普适性等角度评估其性能.其中,信道模型的准确度是指通过比较信道传输机理的仿真结果与测量数据,衡量信道模型能够描述实际通信环境的匹配程度.信道模型的高效性是指能够优化信道传输机理的计算复杂度,在数值上主要通过计算机的运算次数和仿真时间来进行衡量.信道模型的普适性是指信道模型是否描述各种参数配置下的信道传输机理.

在现有研究中,大部分文献通过推导信道复冲激响应函数表达式分析信道的空时频非平稳传输机理,例如空间互相关特性、时域自相关特性、频域相关特性等.然而,在面对6G巨流量无线通信时,由于无线传输信道数据呈现指数增长,依旧采用信道复冲激响应计算分析信道特性会带来比较大的计算复杂度,给计算机仿真带来较大的负担.为解决这一问题,现有文献提出了一些高效信道特性优化方法.例如,文献[13]和文献[30]分别提出了到达角度估计算法和酉矩阵变换算法优化分析信道的空时频非平稳传输机理.仿真结果指出,与采用信道复冲激响应分析信道传输机理相比,采用优化算法能够在很大程度上减少计算复杂度,缩短仿真时间,为探索6G无线信道传输机理提供高效的分析手段.因此,在探索RIS使能无人机高效通信信道传输机理时,提出更好的优化算法实现高效信道特性分析从而降低信道特性分析复杂度,会是一个非常重要的研究方向.

此外,在分析RIS使能无人机通信信道统计特性时,基于近场传输环境(球面波的假设)能够提高仿真结果准确性,但会造成非常大的计算复杂度,给计算机带来较长的仿真时间.然而,基于远场传输环境(平面波的假设)虽然可以降低仿真时间,但是会影响结果的计算准确性.此时,如何平衡信道模型的准确度和高效性会是一大研究难点.另外,在采用信道复冲激响应描述传输环境的物理属性时,增加模型参数会增加描述通信环境的准确度,但同时会影响建模的高效性;而减少模型参数会提高建模的高效性,但同时会影响信道模型匹配实际通信环境的准确度.此时,如何平衡信道模型的准确度和普适性会是一大研究难点.此外,增加RIS阵列中的单元数目虽然能够提升通信系统性能,但是会增加通信开销^[31,32].因此,如何平衡通信性能提升与通信开销之间的关系,实现RIS使能无线高效通信,会在未来成为重要解决的问题.因此,在探索RIS使能无人机通信传输机理时,如何平衡信道模型的准确度、高效性和普适性之间的关系,仍是一个挑战.

4 结束语

本文首先介绍了 6G 无人机通信的发展现状,阐明了引入 RIS 技术的必要性,并揭示了 RIS 使能无人机信道特性;然后,全面阐述了 RIS 使能无人机高能效通信系统模型和信道建模方法;最后,总结了面向 6G 高能效 RIS 使能无人机通信信道特性分析与建模所面临的技术挑战和研究方向.通过分析 RIS 使能无人机高能效无线通信系统信道特性分析方法的已有研究成果,归纳现有的研究方法,描述未来挑战与发展方向,为后期系统研发提供新的解决方案与思路.

总体而言,针对本文论述的面向 6G 的 RIS 使能无人机高能效无线通信信道建模与特性分析理论,已开展了初步的研究工作,但是现有信道模型的普适性不够全面,信道特性分析方法较为单一,对相应场景下新的信道传输机理的刻画不够深入,尚无法满足系统性能分析与设计需求,需要在未来开展更为深入的研究工作.

参考文献

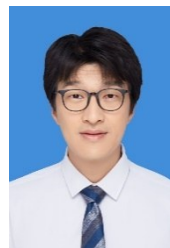
- [1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] 王承祥, 黄杰, 王海明, 等. 面向 6G 的无线通信信道特性分析与建模[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 19-32.
WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G oriented wireless communication channel characteristics analysis and modeling[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 19-32. (in Chinese)
- [3] ÖZDOĞAN Ö, BJÖRNSON E, LARSSON E G. Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(5): 581-585.
- [4] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告[R]. IMT-2030 (6G)推进组, 2021.
CUI T J, JIN S, ZHANG J Y, et al. Research on Reconfigurable Intelligent Surfaces Technology[R]. IMT-2030 (6G) Promotion Group, 2021. (in Chinese)
- [5] 孙健, 张文胜, 王承祥. 5G 高频段信道测量与建模进展[J]. 电子学报, 2017, 45(5): 1249-1260.
SUN J, ZHANG W S, WANG C X. Developments on channel measurement and models in 5G high frequency band[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(5): 1249-1260. (in Chinese)
- [6] BASAR E, YILDIRIM I. Reconfigurable intelligent surfaces for future wireless networks: A channel modeling perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(3): 108-114.
- [7] YILDIRIM I, UYRUS A, BASAR E. Modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces for indoor and outdoor applications in future wireless networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(2): 1290-1301.
- [8] HUANG J, WANG C X, SUN Y Z, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: Channel characterization and modeling[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(9): 1290-1311.
- [9] MATOLAK D W, SUN R Y. Unmanned aircraft systems: Air-ground channel characterization for future applications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(2): 79-85.
- [10] 张洪铭, 闫实, 唐斌, 等. 海上无线通信技术: 现状与挑战[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(4): 392-401.
ZHANG H M, YAN S, TANG B, et al. Maritime communications technologies: Current progress and challenges[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(4): 392-401. (in Chinese)
- [11] LIU Y, WANG C X, CHANG H T, et al. A novel non-stationary 6G UAV channel model for maritime communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2992-3005.
- [12] 李忻, 聂在平, 黄绣江. 动态 MIMO 散射无线信道模型及性能分析[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1660-1663.
LI X, NIE Z P, HUANG X J. Dynamic MIMO scattering wireless channel model and its performance[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1660-1663. (in Chinese)
- [13] JIANG H, ZHANG Z C, WANG C X, et al. A novel 3D UAV channel model for A2G communication environments using AoD and AoA estimation algorithms[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(11): 7232-7246.
- [14] SUN G Q, HE R S, AI B, et al. A 3D wideband channel model for RIS-assisted MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8016-8029.
- [15] JIANG H, RUAN C Y, ZHANG Z C, et al. A general wideband non-stationary stochastic channel model for intelligent reflecting surface-assisted MIMO communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 5314-5328.
- [16] 张明, 张建华, 高新颖, 等. 一种通用宽带 MIMO 信道模型[J]. 电子学报, 2006, 34(10): 1758-1762.
ZHANG M, ZHANG J H, GAO X Y, et al. A generalized broadband MIMO channel model[J]. Acta Electronica Si-

- nica, 2006, 34(10): 1758-1762. (in Chinese)
- [17] JIANG H, MUKHERJEE M, ZHOU J, et al. Channel modeling and characteristics for 6G wireless communications[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 296-303.
- [18] WU Q 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.
- [19] XIONG B P, ZHANG Z C, JIANG H, et al. A 3D non-stationary MIMO channel model for reconfigurable intelligent surface auxiliary UAV-to-ground mmWave communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(7): 5658-5672.
- [20] NDJONGUE A R, NGATCHED T M N, DOBRE O A, et al. Toward the use of re-configurable intelligent surfaces in VLC systems: Beam steering[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(3): 156-162.
- [21] ELMOSSALLAMY M A, ZHANG H L, SONG L Y, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(3): 990-1002.
- [22] ZHU Q M, MAO K, SONG M Z, et al. Map-based channel modeling and generation for U2V mmWave communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8004-8015.
- [23] KHAWAJA W, OZDEMIR O, GUVENC I. UAV air-to-ground channel characterization for mmWave systems [C]//2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway: IEEE, 2018: 1-5.
- [24] 江浩, 张在琛, 党建, 等. 三维空间非平稳车载几何信道模型的研究分析[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1265-1268.
JIANG H, ZHANG Z C, DANG J, et al. Analysis of 3D geometry-based models for non-stationary vehicle-to-vehicle channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(5): 1265-1268. (in Chinese)
- [25] JIANG H, ZHANG Z C, WU L, et al. A 3-D non-stationary wideband geometry-based channel model for MIMO vehicle-to-vehicle communications in tunnel environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(7): 6257-6271.
- [26] CAO C J, LIAN Z X, WANG Y J, et al. A non-stationary geometry-based channel model for IRS-assisted UAV-MIMO channels[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(12): 3760-3764.
- [27] JIANG H, HE R S, RUAN C Y, et al. Three-dimensional geometry-based stochastic channel modeling for intelligent reflecting surface-assisted UAV MIMO communications[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2021, 10(12): 2727-2731.
- [28] HAN Y T, ZHANG S W, DUAN L J, et al. Double-IRS aided MIMO communication under LoS channels: Capacity maximization and scaling[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2820-2837.
- [29] JIANG H, ZHANG Z C, WU L, et al. Three-dimensional geometry-based UAV-MIMO channel modeling for A2G communication environments[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(7): 1438-1441.
- [30] JIANG H, XIONG B P, ZHANG Z C, et al. Novel statistical wideband MIMO V2V channel modeling using unitary matrix transformation algorithm[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 4947-4961.
- [31] ZHENG B X, YOU C S, ZHANG R. Double-IRS assisted multi-user MIMO: Cooperative passive beamforming design[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4513-4526.
- [32] LI J, FU M, ZHOU Y, et al. Double-RIS assisted over-the-air computation[C]//2021 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE, 2022: 1-6.

作者简介



张在琛 男, 1975年1月出生于江苏省南京市. 现为东南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 获2019年度教育部技术发明一等奖, 另获2018年国家级教学成果二等奖、中国物理学会2016年度最有影响论文奖一等奖、IEEE WCSP2019最佳论文奖等. 主要研究方向为第6代移动通信系统、光移动通信技术和量子信息技术. 中国电子学会会员编号: E190005699F. E-mail: zczhang@seu.edu.cn



江浩 男, 1989年9月出生于江苏省南京市. 2019年毕业于东南大学. 现为南京信息工程大学副教授. 主要研究方向为第6代移动通信系统方面. 中国电子学会会员编号: E190042484M. E-mail: jianghao@nuist.edu.cn