

文章编号: 2095-4980(2024)03-0240-09

智能超表面辅助低轨卫星通信技术综述

何俊岩¹, 赖海光², 赵鑫杰¹, 刘子威¹, 张更新¹

(1.南京邮电大学 卫星通信研究所, 江苏 南京 210003; 2.南京控维通信科技有限公司, 江苏 南京 211135)

摘要: 卫星通信能够提供超视距、大容量的通信服务,但在城市区域、峡谷森林等视线受遮蔽严重的区域,会出现视距衰落严重、多径效应显著等问题,影响通信质量。近年来出现的智能超表面(RIS)可以通过动态控制反射单元的电磁性质,构建可控电磁环境,为改善低轨(LEO)卫星通信质量提供新的思路。本文基于RIS基本原理与优势,对RIS用于LEO卫星通信中信道建模、信道估计、波束成形等关键技术进行探讨,最后分析了目前RIS在实际应用中面临的主要挑战,以期为LEO卫星场景下的RIS研究提供参考。

关键词: 智能超表面; 低轨卫星通信; 信道建模; 波束成形

中图分类号: TN927.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023419

Overview of reconfigurable intelligent surface for Low Earth Orbit satellite communication

HE Junyan¹, LAI Haiguang², ZHAO Xinjie¹, LIU Ziwei¹, ZHANG Gengxin¹

(1.Institute of Satellite Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;
2.Cowave Satellite Communication Technology Co., Ltd, Nanjing Jiangsu 211135, China)

Abstract: Satellite communication can provide over-the-horizon, large-capacity communication services. Nevertheless, there will be serious line-of-sight fading and significant multipath effect in urban areas, canyons, forests and other areas where the line of sight is seriously obscured, which will result in the degradation of network communication performance. Recently, an emerging technology—the Reconfigurable Intelligence Surface(RIS) is capable of dynamically altering wireless channels by flexibly controlling the electromagnetic properties of passive reflecting elements, providing a novel route for improving the quality of Low Earth Orbit(LEO) satellite communication. Based on the basic principles and advantages of RIS, the key technologies such as channel modeling, channel estimation, and beamforming in the RIS aided LEO satellite communication are discussed. Finally, the main challenges faced of RIS in practical applications are analyzed. This work can provide a reference for research in the field of RIS aided LEO satellite communication.

Keywords: Reconfigurable Intelligent Surface; Low Earth Orbit satellite communication; channel model; beamforming

第三代合作伙伴计划(the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在TR38.811指标中提出空天地一体化网络概念,旨在实现全球“无缝”的信息通信能力。目前,对于山区、森林、无人区等区域,地面现存的蜂窝基站仍难以实现全面部署,同时现有的蜂窝基础设施还容易受到自然灾害影响,通信链接存在中断风险^[1]。卫星通信定义为以卫星作为中继站,进行无线电波发射或转发的一种通信方式。由于其不受地理环境约束,能够实现较广的无缝覆盖,具有稳健性强、支持业务多、抗毁伤等特点,作为现有蜂窝基础设施的补充网络被广泛研究。近几年,以美国Starlink、OneWeb、中国卫星互联网系统为代表的低轨大规模星座正在紧密地部署,相比于中高轨卫星,具有更低的延迟、路径损耗与发射成本,逐渐成为未来全球通信发展的热点^[2]。

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U21A20450; 62271266); 江苏省前沿引领技术基础研究专项资助项目(BK20192002; BK20212001)

采用低轨卫星辅助地面网络也面临着诸多挑战。首先，由于星地距离远，传播损耗大，通常需要较大的天线口径形成波束获得传输增益；同时，随着未来工作频段的进一步提升，高增益点波束成为发展趋势。上述特点进一步要求卫星通信具有“见天通”的特性，其在强遮蔽、衰落、无直射路径的场景中将难以工作。在传统无线通信系统中，往往通过改进信源信宿改变通信质量，通过天线高精度指向跟踪技术与收发信号波束研究保证直达径畅通，无法主动控制无线信道环境。目前提出的空中中继辅助卫星和地面终端通信，由于其高功耗和需要通过使用定制的天线和信号处理方法消除环回自干扰，进一步增加了系统复杂度。

智能超表面(RIS)的出现使改变传播环境成为了可能。RIS起源于对“超材料”的研究，早期，超材料功能单一，只能按照固化的模式工作，称之为模拟超材料。2014年，东南大学崔铁军院士团队首先提出可编程超材料，采用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)控制超表面电磁单元可调元件，实现对1 bit和2 bit数字超材料的相位与幅度响应的数字化控制，这一研究为RIS的电磁世界和信息科学的数字世界之间提供了接口，促进了RIS在无线网络领域的发展^[3]。RIS通过对空间中入射信号传输链路的调控，实现提高通信传输性能的目的。目前，中兴联合运营商与高校已对RIS在5G地面网络下的通信能力进行了技术测试，取得了巨大进展，大量实验表明RIS可以有效提高现有网络的通信质量与覆盖能力。相比于传统无线中继，能在不引入自干扰的情况下，实现全双工通信，具有低能耗、低噪声、易部署、易扩展等特点。

目前，面向卫星通信引入RIS的研究主要包括两类：一类是将RIS布置于卫星上替代传统相控阵，以更轻的质量、更小的体积实现大规模天线阵列^[4-5]；第二类将RIS布置在地面，利用其改变信道环境的特性，实现非视距(Non Line Of Sight, NLOS)场景下的覆盖补盲与视距(Line Of Sight, LOS)场景下的信号增强等功能^[6-13]。同时，由于其低功耗、易部署的特点，尤为适合在偏远地区等基础设置较不完善的区域布置，满足卫星通信旨在提供全球覆盖通信的特点，为提高卫星通信质量提供了新途径和新思路。

本文主要针对地面端布置RIS辅助低轨(LEO)卫星通信场景与研究现状，对RIS辅助LEO卫星通信前沿问题进行深入思考，针对其现有的技术难点以及挑战，对未来研究方向及发展趋势进行总结与展望。

1 RIS辅助LEO卫星通信场景

RIS在地面网络得到了广泛应用与验证，但RIS针对卫星网络仍处于理论研究阶段。相比于地面场景，卫星场景具有位置坐标变化大，信号衰耗大，直达径要求高，通信频率高，定向天线孔径受限等特点，对RIS在卫星网络中的实际应用提出了挑战。目前，对相关场景中RIS的研究方向有卫星-地面综合网络安全协同传输、非可视链路(或可视链路)的通信增强、卫星物联网能效优化、RIS辅助卫星网络信道估计等，具体文献研究重点及优化方法如表1所示。

表1 RIS辅助低轨卫星通信文献及其研究方向总结

Table 1 A summary of papers on RIS aided low orbit satellite communication

reference	research interests	channel	design objective	optimization
[9]	secure communication	LOS; Rayleigh; far-field	secrecy capacity maximization	deep cascade correlation learning
[10]	secure communication	LOS; Rayleigh; atmospheric effects; far-field	SINR at Eve minimization	AO, SDR
[6]	a continuous time system mode	LOS; time-delayed; Doppler; far-field	the received power maximization	joint optimization
[11]	NLOS SatCom	NLOS; near-field	SNR at User maximization	joint optimization
[12]	improve QOS	NLOS; Rician; atmospheric effects; far-field	weighted sum rate maximization	AHC; BCD; FP; RM; SCA
[13]	improve QOS	LOS; far-field	average throughput maximization	two sequential methods; SQO; SDR
[7]	improve energy efficiency	LOS; Rician; Doppler; far-field	energy efficiency maximization	AO; SCA; Lagrangian dual-method
[14]	Channel Estimation	LOS; far-field	Achievable Rate maximization	LS; multiple signal classification
[15]	Channel Estimation	—	Bit Error Rate minimization	Graph Attention Networks

1.1 RIS辅助LEO卫星覆盖补盲

卫星通信具有“见天通”的特性，其在城市、峡谷、森林等地区的应用常受到LOS链路阻碍。当LOS链路受到阻隔时，通信中断。考虑到卫星波束的较大覆盖能力，可同时保证RIS与接收机在同一个波束下，如图1所示。可在NLOS场景下利用RIS通过智能反射，使波束内的部分信号绕过卫星与用户之间的障碍物，创造虚拟视距(Virtual Line Of Sight, VLOS)路径，通过VLOS路径取代NLOS路径，解决卫星通信受阻问题。

对卫星通信场景，现有文献一般将上^[6]、下^[7]行链路分开讨论，或说明采用时分双工(Time Division Duplexing, TDD)的通信方式保证上、下行通信链路的互易性^[8]。与地面通信场景不同，由于卫星通信传播损耗大，为保证通信质量，高频段宽带通信时多采用定向天线，低频段通信也会采用弱方向性天线。通过计算，3 GHz频段下，0.8 m孔径天线波束主瓣宽度约为9°；30 GHz频段下，主瓣宽度仅为1°。在视野严重遮蔽条件

下，由于 SAT-User(卫星到用户)直视路径几乎不通，该情况下信号只能通过 SAT-RIS-User 链路实现通信。为保证通信质量，需使定向天线不再指向跟踪卫星，而是面向 RIS，实现通信。

在该场景下，SAT-RIS 通信信道一般假定不通过地面障碍，采用考虑大气效应的自由空间衰落模型模拟信道。对于 RIS-User 信道，在定向天线对齐 RIS 的情况下，由于经过地面障碍，则需分为是否具有 LOS 径来考虑。对于 RIS 可以产生虚拟视距的场景，由于地面树木建筑物的反射和阻挡，会导致阴影衰落和多径干扰，需考虑莱斯衰落；对于雨林等直射径弱的场景，则需考虑瑞利衰落。

1.2 RIS 辅助低轨卫星通信增强

实现 LOS 场景下的通信信号增强是 RIS 辅助通信的另一种场景。在该场景下，假设信号可相干叠加，RIS 可以通过反射构建额外的通信通路，提高接收机接收功率。但 RIS 会使信号产生损耗，对通信质量较好的 LOS 场景，通信质量提升较小。文献[16]通过对地面网络进行计算，在 LOS 场景下，无源 RIS 对通信容量的提升仅有 22%。文献[6]对相关低轨卫星模型进行仿真，在 RIS 配置 610×407 单元的情况下，可实现 3~6 dB 的信噪比增益，与 NLOS 场景相比，功率提升较小。

同时，对于 LOS 场景下 RIS 的布置也存在技术困难。目前文献中对 LOS 场景主要分为两种情况：视野受限下的 LOS 场景^[11]与开阔视野下的 LOS 场景^[13]，如图 2 所示。对于视野受限的 LOS 场景，如城市峡谷场景，实际可保持 LOS 径的时间较短，对整体通信质量影响不大，可在卫星过顶时，将接收天线对准卫星实现通信。对于开阔场景下的 LOS 场景，如荒漠戈壁等场景，在 LEO 卫星系统可以保持正常通信的情况下，有些文献参考地面场景，引入 RIS 构建额外通信链路，理论上可以提升系统能力，但要确定具体合适的应用场景，才能保证研究的意义与可行性。实际应用中，若考虑为未来可能的手机直连卫星或宽波束接收天线场景，则可以保证卫星链路与 RIS 反射链路均可被接收机接收，实现通信增强。目前大部分文献中考虑的是如上情况，但忽略了接收天线主瓣波束宽度的影响。对于卫星通信的大多数场景，由于路径损耗大，通信频段高，定向天线接收波束问题是不可忽略的挑战。一方面，难以保证 RIS 和 SAT 同时在接收天线波束主瓣，在天线对准卫星的情况下，则 SAT-RIS-User 链路往往只能被天线副瓣接收，导致接收机增益过低，实际应用中，通信容量提升较小；另一方面，为确保 RIS 和卫星同时在接收机波束主瓣的接收范围内，会不可避免地导致 SAT-RIS 的入射角过大。假设用户对准 1 500 km 的低轨卫星，RIS 垂直放置时，RIS 位置及信号入射角随主瓣波束宽度变化如表 2 所示。文献[11]通过仿真说明了 SAT-RIS 之间具有 80° 入射角的情况下，50 m 覆盖范围内，SAT-RIS-User 链路通信信噪比接近于 0 dB，因此在其仿真过程中对具有直视链路的时间段并没有使用 SAT-RIS-User 链路。

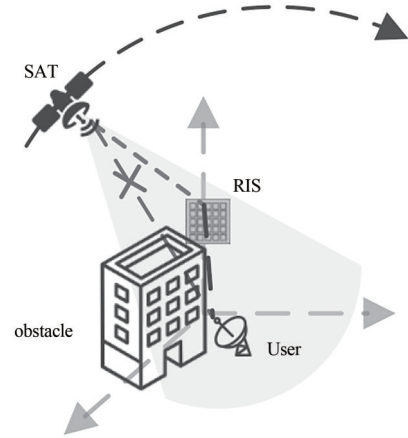


Fig.1 RIS-aided LEO satellite communication system in NLOS
图 1 NLOS 场景下 RIS 辅助低轨卫星通信

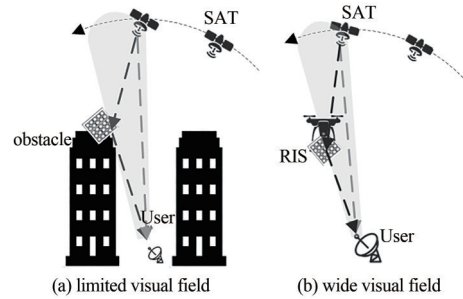


Fig.2 RIS-aided LEO satellite communication system in LOS
图 2 LOS 场景下 RIS 辅助低轨卫星通信

表 2 SAT-RIS 入射角测算

Table2 Calculation of incidence angle for SAT-RIS

half-power beamwidth for user/(°)	RIS height/m	RIS horizontal distance/m	satellite elevation angle/(°)	incidence angle for SAT-RIS/(°)
30	100	26.8	75.0	74.998 1
20	100	17.6	80.0	79.998 7
9	100	7.9	85.5	85.499 4
1	100	1.7	90.0	89.999 9

为解决 LOS 场景下的上述问题，在后续研究中，一方面可以考虑应用低频段，使用波束宽度较大的天线。在该种假设下，如何平衡天线对准与 RIS 的位置是需要考虑的问题，这在目前研究中并未提及；另一方面，可以考虑使用有源 RIS 与可同时反射与透射的可重构智能表面(Simultaneously Transmitting And Reflecting Reconfigurable

Intelligent Surface, STAR-RIS)等新式 RIS：利用有源 RIS 实现对信号的放大，弥补乘性损耗问题。根据文献[16]的仿真与原型机验证结果，有源 RIS 相比于无源 RIS，在 NLOS 与 LOS 均能显著提升系统容量。利用 STAR-RIS^[17]透射的特点，可以使卫星与用户天线在非同侧，突破了 SAT-RIS 高入射角的限制，通过透射实现 SAT-RIS-User 链路通信增强，目前在卫星网络中对此的相关研究仍较少。

2 RIS 辅助 LEO 卫星通信关键技术

2.1 卫星场景三维坐标建模

在地面网络中需要考虑用户的运动状态，而在 LEO 卫星网络中，由于 LEO 的高移动性，LEO 的位置变化大，会产生多普勒等效效应，不能再用静态模型对系统进行建模，需开发一个连续的时间模型，获取通信信道的实时信道特征，因此建立通信场景的三维坐标系具有十分重要的意义。目前文献中对卫星运动场景的坐标建模方式包括：通过星历获取卫星实时位置信息^[9]与建立模拟卫星运动轨迹获取连续时间的三维坐标系^[6]。实际应用中，前者更具有准确性，但其为位置坐标信息的点集，更适用于对单独某时刻进行分析；后者对获取模拟场景下信道变化更为便利，更具有持续性。据此，提出了城市峡谷视野受限下的星地三维坐标场景，如图 3 所示^[11]。

设 User 坐标为 (0,0,0)，User 与遮挡物距离为 W ，遮挡物高度为 H ，可得卫星最小可视仰角 $\alpha_{\min} = \arctan \frac{H}{W}$ 和最小可视地心角 β_{\min} ，卫星在该角度外为 NLOS 信道。卫星高度为 h ，地球半径为 R ，假设卫星运动速度为 v ，则地心角为 $\beta = \frac{v}{R+h}t$ ，卫星坐标可表示为 $(d \cos \alpha, 0, d \sin \alpha)$ ，其中 SAT 到 User 距离为 $d = \sqrt{R^2 + (R+h)^2 - 2R(R+h)\cos \beta}$ ，仰角为 $\alpha = \arcsin \frac{(R+h)\sin \beta}{d}$ ^[6]。可利用卫星坐标联合 RIS 位置坐标，获取距离、入射角等信息。

2.2 通信近远场分析

在 RIS 模型的研究中，现有模型常基于 RIS 远场信道模型设计，对 RIS 近场特性的研究依然较少。由于 RIS 超大孔径以及卫星场景通信在高频段的影响，用户可能处于 RIS 的近场区域。文献[18]提出了 RIS 近场传播模型并验证了其正确性，建模中 RIS 每片单元为满足同向同性增益的阵列天线，RIS 辐射模型如图 4 所示。RIS 单元的归一化功率辐射方向图可表示为球坐标系中的函数 $F(\theta, \varphi)$ ：

$$F(\theta, \varphi) = \begin{cases} \cos^b \theta, & \theta \in [0, \frac{\pi}{2}], \varphi \in [0, 2\pi] \\ 0, & \theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi], \varphi \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad (1)$$

式中： θ 和 φ 分别为天线到某个发射/接收方向的仰角和方位角； b 为视轴增益。由此可以计算出 RIS 关于函数 $F(\theta, \varphi)$ 的增益。

若电磁场为远场时，到达 RIS 电磁波为均匀平面波，即到每个单元的仰角和方位角均相同；对于近场通信，由于每片 RIS 单元辐射功率需要单独计算，提高了相位优化的复杂度，同时，近场信道的非稀疏特征也将导致针对远场区提出的信道估计方式并不适用于近场区^[19]。

对于 RIS 布置在近地面侧的卫星场景，SAT 与 RIS 之间的距离很大，因而考虑 SAT-RIS 电磁场辐射为远场。

而对于 RIS 到 User 信道电磁场辐射需要根据弗劳恩霍夫距离 $\frac{2D^2}{\lambda}$ 计算判断是否为近场，其中波长可通过 $\lambda = \frac{c}{f_c}$ 计算获得，式

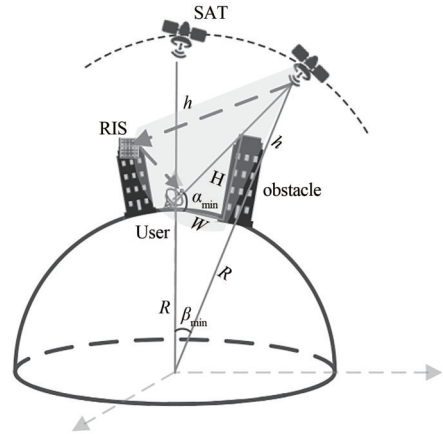


Fig.3 Three-dimensional coordinate model of satellite-to-ground
图3 三维星地坐标模型

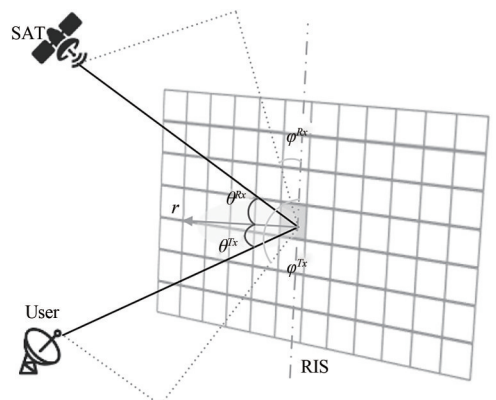


Fig.4 RIS radiation model
图4 RIS 辐射模型

中 c 为光速, f_c 为电磁波频率。RIS 是由 $M \times N$ 个单元组成的阵列, 单元长度为 a , 单元间隔为 b , 单元尺寸与间隔一般小于 $\frac{\lambda}{4}$ 。天线最大几何尺寸 $D = \sqrt{(aM + b(M-1))^2 + (aN + b(N-1))^2}$, 据此计算弗劳恩霍夫距离。大于该距离, 则为远场^[20]。随着通信载频的提高以及 RIS 的大型化, 无线信号的电磁衍射域从远场转移到近场。若天线最大几何尺寸为 1 m 的 RIS 单元, 在 3 GHz 频率下, 通信弗劳恩霍夫距离约为 20 m; 在 30 GHz 频率下, 通信弗劳恩霍夫距离将扩展为 200 m。因此 RIS 与 User 的距离、RIS 近场工作状态下的电磁辐射特性也是未来研究中必须考虑的问题。

2.3 RIS 辅助 LEO 卫星信道建模

RIS 实现对电磁环境的调控, 需获取信号的信道信息与入射角信息。在无法通过信道估计获取信道信息的情况下, 现有研究往往先通过对应的信道建模模拟其信道信息。实际测试系统中, 信道模型准确性对 RIS 辅助通信的相关性能也具有决定性影响。在无线通信系统引入 RIS 后, 传播模式与路径会发生变化, 形成 RIS 耦合信道。依据 RIS 信道特性, RIS 辅助传输模型接收信号可以建模为通用的级联信道模型, 接收信号表示为:

$$\mathbf{y} = (H_{RU}^T \boldsymbol{\Theta} H_{TR} + H_{SU}) \mathbf{S} + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中: H_{RU} 、 H_{TR} 、 H_{SU} 分别表示 RIS 到 User、SAT 到 RIS、SAT-User 的等效信道, 若直视信道不存在, 则 H_{SU} 不存在; $\boldsymbol{\Theta}$ 为 RIS 的反射系数矩阵; \mathbf{S} 为发射机发射信号; $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2)$ 为接收机处的加性高斯白噪声。

在此基础上, 对于具体的信道有基于几何的统计性^[18,21-22]、基于射线跟踪^[18,23]等建模方法。基于几何的统计性建模思路是以经验的测量数据来支撑, 参考 3GPP 的路径损耗公式, 并通过大、小尺度参数对信道数据进行统计描述。该方式忽略了 RIS 的物理、电磁特性, 阵元孔径、近远场效应等影响, 对 RIS 耦合信道是否具有原始信道特征依然有待实验进一步验证。崔铁军院士团队利用射线追踪建模的方式对 RIS 辅助信道进行建模, 根据 RIS 与收发端的位置信息, 通过 RIS 的电磁特性计算入射与反射电磁波的方向增益, 由此获得每条射线的接收功率、相位、离开角、到达角等信息。提出的 RIS 自由空间传播模型如式(3)所示, 并通过实际测试验证其正确性^[19]。

$$P_r = P_t \frac{G_r G_t G d_x d_y \lambda^2 A^2}{64\pi^3} \times \left| \sum_{m=1-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=1-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sqrt{F_{n,m}^{\text{combine}}} e^{\frac{-j(2\pi(r'_{n,m} + r''_{n,m}) - \lambda\phi_{n,m})}{\lambda}} \right|^2 \quad (3)$$

式中: G_r 、 G_t 、 G 分别表示接收机、发射机、RIS 的增益; d_x 、 d_y 为 RIS 单元尺寸; A 为 RIS 振幅系数; ϕ 为 RIS 反射相位; r 为距离; $\sqrt{F_{n,m}^{\text{combine}}}$ 为发射机、接收机以及 RIS 的归一化功率辐射方向图乘积, 反映了归一化辐射方向图对接收信号功率的影响, 下标 m 、 n 表示 RIS 的第 m 行第 n 列单元。

该自由空间传播模型在目前 RIS 辅助卫星通信相关研究被广泛使用, 但由于模型本身并未对多径与小尺度衰落、大气衰落等进行讨论, 因此对基于该模型下的具体卫星通信信道建模仍具有研究价值, 文献[11]讨论了 RIS 与用户近场通信模型, 文献[24]考虑了大气影响。

2.4 RIS 辅助 LEO 卫星信道估计

实际应用中, 理论信道与现实信道存在误差, 信道获取的不准确性会严重影响 RIS 波束成形的效果。因此, 获取精准的 SAT-RIS-User 级联信道状态信息(Channel State Information, CSI)是 RIS 系统中亟需解决的基本问题。目前研究中常用信道估计方法及其分类如图 5 所示。

采用基于导频的信道估计方式实现 RIS 辅助地面网络信道估计。RIS 按类可分为无源 RIS 和感知 RIS, 对于典型无源 RIS, 信道估计通过发送导频, 基站基于设定的反射系数, 通过矩阵运算级联的 SAT-RIS-User 信道。由于其不具备任何有源 RF 链的特点, 导致分段信道信息获取困难。由此提出感知 RIS 的概念, 通过配备处理感测信号的接收射频链, 可以直接获取分段信道的 CSI^[25]。根据 RIS 控制方式的不同, 可分为基于开/关的逐元件反射^[26]、全导通 RIS 反射^[27]等模式。前者是对每片 RIS 单元在时隙中分别反射, 获取每片单元对应的信道信息; 后者通过对每个导频符号时隙下 RIS 单元全反射的系数矩阵求最优系数并迭代, 从而获取最佳反射矩阵。该方法反射功率损耗小, 反射信号功率强, 可以确保信道估计的精确度, 被广泛采用。其中, 由于 RIS 多单元以及 MIMO 系统多用户特性, 使信道估计开销急剧提高。为解决该问题, 针对 RIS 与信道具体特性(稀疏、低秩、空间相关等)进行研究, 提出了基于压缩感知^[28]、基于二时序估计^[29]、基于低复杂度码本反馈^[30]、基于 RIS 单元分块^[31]等一系列信道估计方法, 也有研究通过引入深度学习^[32]算法提高信道估计速度与准确性。

对于 RIS 辅助低轨卫星通信场景, 信道估计相关工作研究较少。在已有研究中, 主要通过如下流程实现信道估计: 首先, 在初始信道估计环节, 根据完美 CSI 预设 SAT 波束赋形向量和 RIS 反射相位; 其次, 在每帧训练周

期内发送导频，并利用相关算法估计导频信号到达角与路径增益，获取 CSI；最后通过获取的 CSI 调整 RIS 对应的向量与相位，增强信道估计性能，在帧数据传输期间通过建立的卫星运动模型对 CSI 进行补偿。在已有文献中，文献[14]讨论 RIS 布置在卫星与用户双侧场景，提出利用多信号分类算法和最小二乘(LS)准则估计 CSI；文献[15]则提出了一种基于图注意网络(Graph Attention Networks, GAT)的信道估计架构，通过提前训练图注意网络，使接收数据的归一化均方误差、估计时间均优于 LS 估计和压缩感知估计。

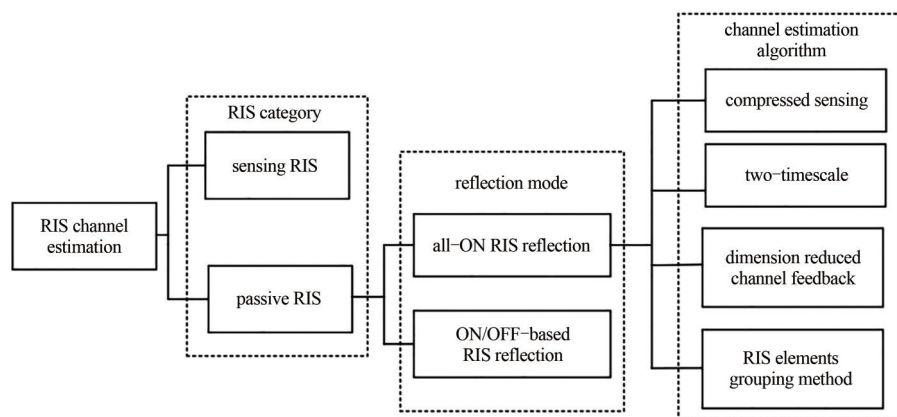


Fig.5 Channel estimation methods and classification of RIS

图5 RIS 信道估计方法及分类

2.5 RIS 辅助低轨卫星通信波束与位置优化

RIS 通过调控相位、调整波束实现通信增强，RIS 反射系数设计的优劣直接影响 RIS 辅助系统的通信质量，是相关研究中广泛讨论与优化的方向。此外，通过式(1)可知，过大的出、入射角将会极大影响接收功率。由此，在该场景下 RIS 的布置与倾斜角度优化也是需考虑的方向。

对于 RIS 反射相位优化问题，现有大部分研究都是从入射角度、接收信号信噪比、能效等角度，使用交替优化、半正定松弛、逐次凸逼近、迭代等优化策略，对发射端发射波束与 RIS 反射波束进行联合优化^[8]，将复杂场景的 RIS 优化问题变为一个多约束多变量的、具有低复杂度的凸优化问题。这些优化方法需要进行多次迭代，计算复杂度较高，难以适应时变信道 RIS 的动态波束成形。基于射线跟踪的方法根据相位对准原理，在发射天线和接收天线的峰值辐射方向都指向 RIS 中心的条件下，利用收发机到 RIS 电磁波的相位差获得最佳的反射系数^[18]。该方法从物理特性出发，简化了计算，但对于多径复杂环境的适用性及卫星运动下辐射方向能否保持对准，仍需进一步研究。

随着人工智能的发展，越来越多的研究使用深度学习技术求解 RIS 波束成形优化问题。相比于传统方法，该方法避免使用交替优化与迭代计算数值解的过程，通过 RIS 波束成形与实际环境交互，采用最优值激励的方式逐步训练最优网络，实现对 RIS 联合波束成形的最优反射系数的预测^[33]，可以更好地应对 LEO 卫星通信的时变信道。此外，有相关研究提出基于位置信息的深度学习联合波束赋形算法^[34]，减少了因获取信道 CSI 而产生的开销，极大提高了通信系统的实时性，在卫星网络中具有一定的应用研究价值。当前相关 RIS 波束成形多针对自由空间场景，相关设计有待进一步研究。

现有文献忽略了对 RIS 的布置与倾斜角度优化问题的讨论，对于卫星通信场景，由于卫星在高空，SAT-RIS 的链路相比 RIS-User 过长，易导致 SAT-RIS-User 的仰角过大，因此对 RIS 的布置与倾斜角度优化也是相关应用中亟需考虑的问题。文献[13]提出了两阶段的优化框架，先通过相位对准原理获取最佳反射系数，再通过二次规划与半正定松弛算法，求解 RIS 倾斜角度的非凸约束优化问题。文献[6,11]中虽未对倾角进行最优化计算，但通过改变 RIS 倾斜角，仍证明了调整仰角对峡谷以及开阔场景下可获得最高 8 dB 的信号增益。

3 RIS 辅助低轨卫星通信面临的挑战

随着 RIS 研究的日益深入，无论是理论研究还是测试验证都取得了相当的积累和成果，诸多文献也陆续提出了 RIS 辅助低轨卫星场景的建模与优化理论，但不少理论仍为地面 RIS 理论的延伸，值得进一步探讨与完善。

3.1 LEO-RIS-User 信道建模与估计

目前，RIS 辅助低轨卫星网络系统的信道建模与信道估计还很不成熟。建模方面，已有的研究大多基于简单的自

由空间损耗系统模型,考虑了多普勒频偏、时延、小尺度衰落、大气影响等因素的 LEO 卫星信道模型并未经过验证;其次,目前的相关研究中并未考虑高频段下地面用户窄波束天线的接收问题。虽然相关自由空间损耗模型在地面网络中已经得到测试,但高路径损耗以及通信频率较高的 LEO 卫星场景下的模型准确性仍存在争议。信道估计方面,目前仍处于萌芽阶段,对于感知 RIS 的研究相对较少,目前工作也多考虑对 TDD 通信系统的信道估计。相比之下, FDD 通信方式会增加训练开销,但在低轨卫星系统中,其设计更具有重要意义。同样,通过引入深度学习等技术辅助传统信道估计方法,可提高估计与波束成形性能^[32],目前,相关算法尚不成熟,仍需进一步研究与测试验证。

3.2 星座场景下的 RIS 配置与切换问题

相关文献中,通常只考虑了一个低轨卫星以及一个 RIS 的场景,这无法有效应对未来大规模星座通信场景的需求。面对 LOS 场景,引入了 RIS 后,由于通信依赖 SAT-RIS-User 链路,基于低路径损耗的选星策略^[35]可能不再具有适用性。因此,在未来研究中加入星座的概念,研究 RIS 辅助低轨卫星星座下的优化与切换策略也具有一定的意义。此外,随着 RIS 研究的深入,未来必然会考虑 RIS 的大规模部署,通过配置多个 RIS 可以提供更多的设计自由度,为增强所需信号提供机会,研究其对 LEO 卫星系统性能的影响具有积极的意义:如文献[11]提出通过双 LEO 卫星和双 RIS 解决单 RIS 在峡谷场景下的通信覆盖范围受限问题;在地面通信的场景中,也有大量文献提出结合中继选择思想进行最优 RIS 选择以及分布式多 RIS 协作通信等思路。值得注意的是,目前此类研究仍是以单个 RIS 建模的方式处理多个 RIS 系统,对多 RIS 之间信号转发、损失、干扰等实际问题的研究并不充分,如何实现多 RIS 系统的合理优化仍是未来研究的一大难点。

3.3 新型 RIS 面向低轨卫星网络应用

目前,LEO 卫星场景下选择的 RIS 单元功能还比较单一,主要是反射电磁波的工作模式。该模式下必须保证接收机与发射机在 RIS 同侧,覆盖范围有限,同时信号易产生相互干扰。当 LEO 卫星过顶后,会导致 SAT-RIS-User 链路中断,采用 STARS-RIS 通过透射提高覆盖范围,可能更适宜应用未来面向低轨卫星场景^[36]。同时,LEO 卫星路径损耗高,RIS 作为无源电磁表面,具有“乘性衰落”等特性,在实际引入中会产生额外的路径损耗,导致通信质量进一步恶化。采用有源 RIS 可在一定程度上解决衰落问题;空中 RIS、感知 RIS 的出现,也可以解决户外通信中断场景下 RIS 的布置问题与信道估计问题。同样,新型 RIS 也将引入新的待解决的问题,包括但不限于有源 RIS、感知 RIS 带来额外的功耗开销与热噪声;空中 RIS 运动会产生多普勒效应,无人机的反射信号也可能对信号产生干扰;新型 RIS 系统的复杂度会进一步提升。可见预见、未来新型 RIS 在 LEO 卫星网络的应用将有更多细节问题值得深入探讨。

3.4 RIS 硬件设计与实用

从信号层面上分析,RIS 的相移是通过将输入信号延迟一定的时间而产生的^[37],这将导致线性相移增加,从而使经 RIS 反射后的接收信号频率偏离载频。这种频率上的不均匀相移可能会导致多载波调制信号出现不期望的相位误差。同样,对于 RIS 辅助通信增强,不同链路到达接收机的相位与时延不尽相同,如何通过硬件或信号处理补偿与实现信号的相干叠加,需要进一步研究。此外,RIS 单元的实时可重构性是另一个常见的假设,RIS 带来的前所未有的容量增益是以高昂的计算成本为代价的,在 LEO 卫星通信这种信道状态信息变化的场景下,实际操作中的 RIS 波束切换具有非实时性。目前文献中多采用瞬时功率评估通信性能,可能会影响对最佳相移的估计,并且若根据 CSI 对 RIS 进行实时重构,引入的总功耗可能并不低。在户外场景下如何实现 RIS 的低功耗波束调控仍值得研究,一定程度上考虑星座下静态配置的 RIS 最佳波束成形,也可作为未来研究的一大方向。其他 RIS 硬件缺陷(如频率/时间偏移、相位噪声、量化噪声等)对其反射设计和可实现性能的影响也很大程度上未知,这需要在未来的工作中进一步研究。

4 结论

本文考虑了 RIS 辅助 LEO 低轨卫星通信的场景与应用,介绍了 RIS 能够通过协调单元元件的反射系数实现信号传播特性的重新配置,改善通信质量的特性。通过对相关场景建模、通信近远场分析及优化算法进行了探讨,阐述了现有文献 RIS 与 LEO 卫星通信场景相结合,提高其通信质量的方案。此外,本文还对 RIS 面临的挑战与未来方向进行了讨论,论证其在实际应用中的可行性。从当前现状看,RIS 辅助 LEO 卫星通信仍更多的停留在理论阶段,相关的信道估计、硬件设计等方面仍有诸多需要探讨的问题,还需开展大量的研究工作。

参考文献:

[1] 邓伟. 基于 3GPP NTN 的天地一体技术与产业发展研究[J]. 通信世界, 2023(21):16-19. (DENG Wei. Research on 3GPP NTN

- based space-ground integrated technology and industrial development[J]. *Communications World*, 2023(21): 16–19. doi: 10.3969/j.issn.1009-1564.2023.21.008.
- [2] GIORDANI M,ZORZI M. Non-terrestrial networks in the 6G era:challenges and opportunities[J]. *IEEE Network*, 2021,35(2): 244–251. doi:10.1109/MNET.011.2000493.
- [3] CUI Tiejun,QI Meiqing,WAN Xiang, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light:Science & Applications*, 2014(3):218. doi:10.1038/lsa.2014.99.
- [4] TEKBIYIK K,KURT G K,EKTI A R, et al. Reconfigurable intelligent surfaces empowered THz communication in LEO satellite networks[J]. *IEEE Access*, 2022(10):121957–121969. doi:10.1109/ACCESS.2022.3223086.
- [5] ROTSHILD D,ABRAMOVICH A. Wideband reconfigurable entire Ku-band metasurface beam-steerable reflector for satellite communications[J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2019,13(3):334–339. doi:10.1049/iet-map.2018.5417.
- [6] MATTHIESEN B,BJÖRNSON E,DE-CARVALHO E, et al. Intelligent reflecting surface operation under predictable receiver mobility:a continuous time propagation model[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020,10(2):216–220. doi:10.1109/LWC.2020.3024781.
- [7] KHAN W U,LAGUNAS E,MAHMOOD A, et al. Energy-efficient RIS-enabled NOMA communication for 6G LEO satellite networks[C]// 2023 IEEE the 97th Vehicular Technology Conference(VTC2023-Spring). Florence,Italy:IEEE, 2023:1–6. doi: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200793.
- [8] WU Qingqing,ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019,18(11):5394–5409. doi:10.1109/TWC.2019.2936025.
- [9] HUANG Chong,CHEN Gaojie,ZHOU Yitong, et al. Deep learning empowered secure RIS-Assisted non-terrestrial relay networks[C]// 2022 IEEE the 96th Vehicular Technology Conference(VTC2022-Fall). London,United Kingdom:IEEE, 2022:1–5. doi:10.1109/VTC2022-Fall57202.2022.10012808.
- [10] XU Sai,LIU Jiajia,CAO Yurui, et al. Intelligent reflecting surface enabled secure cooperative transmission for satellite-terrestrial integrated networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021,70(2):2007–2011. doi:10.1109/TVT.2021.3055965.
- [11] TIAN Xiaowen,GONZALEZ-PRELCIC N,SHIMIZU T. Enabling NLoS LEO satellite communications with reconfigurable intelligent surfaces[DB/OL]. (2022-05-31)[2023-12-21]. <https://arxiv.org/abs/2205.15528>.
- [12] DONG Hao,HUA Cunqing,LIU Lingya, et al. Intelligent reflecting surface-aided integrated terrestrial-satellite networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023,22(4):2507–2522. doi:10.1109/TWC.2022.3212049.
- [13] ZHENG Ziyuan,JING Wenpeng,LU Zhaoming, et al. RIS-enhanced LEO satellite communication:joint passive beamforming and orientation optimization[C]// 2022 IEEE Globecom Workshops(GC Wkshps). Rio de Janeiro,Brazil:IEEE, 2022:874–879. doi: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008708.
- [14] ZHENG Beixiong,LIN Shaoe,ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface-aided LEO satellite communication:cooperative passive beamforming and distributed channel estimation[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022,40(10):3057–3070. doi:10.1109/JSAC.2022.3196119.
- [15] TEKBIYIK K,KURT G K,EKTI A R, et al. Graph attention networks for channel estimation in RIS-assisted satellite IoT communications[DB/OL]. (2021-04-01)[2023-12-21]. <https://arxiv.org/abs/2104.00735>.
- [16] ZHANG Zijian,DAI Linglong,CHEN Xibi, et al. Active RIS vs. passive RIS:which will prevail in 6G?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023,71(3):1707–1725. doi:10.1109/TCOMM.2022.3231893.
- [17] LIU Yuanwei,MU Xidong,XU Jiaqi, et al. STAR: simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021,28(6):102–109. doi:10.1109/MWC.001.2100191.
- [18] TANG Wankai,CHEN Mingzheng,CHEN Xiangyu, 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. doi: 10.1109/TWC.2020.3024887.
- [19] 罗文字,马怡乐,邵霞,等. 基于大规模可重构智能表面的近远场混合信道模型[J]. *电子与信息学报*, 2022,44(11):3866–3873. (LUO Wenyu,MA Yile,SHAO Xia, et al. Near-far field hybrid channel model based on massive reconfigurable intelligent surface[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022,44(11):3866–3873.) doi:10.11999/JEIT220663.
- [20] 陈昂,陈力,卫国. 近场通信与定位:从球面波前模型到电磁场理论[J]. *中兴通讯技术*, 2022,28(5):7–12. (CHEN Ang,CHEN Li,WEI Guo. Near-field communication and positioning:from spherical wavefront model to electromagnetic field theory[J]. *ZTE Technology Journal*, 2022,28(5):7–12.) doi 10.12142/ZTETJ.202205003.
- [21] LEE J,SHIN W,LEE J. Performance analysis of IRS-assisted LEO satellite communication systems[C]// 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence(ICTC). Jeju Island,Korea:IEEE, 2021:323–325. doi:

- 10.1109/ICTC52510.2021.9621010.
- [22] XIONG Baiping,ZHANG Zaichen,JIANG Hao,et al. A statistical MIMO channel model for reconfigurable intelligent surface assisted wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1360–1375. doi:10.1109/TCOMM.2021.3129926.
- [23] AZIZ M A,RAHMAN M H,SEJAN M A S,et al. Spectral efficiency improvement using Bi-Deep learning model for IRS-Assisted MU-MISO communication system[J]. Sensors, 2023,23(18):7793. doi:10.3390/s23187793.
- [24] TEKBIYIK K,KURT G K,YANIKOMEROGLU H. Energy-efficient RIS-assisted satellites for IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022,9(16):14891–14899. doi:10.1109/JIOT.2021.3112881.
- [25] ALEXANDROPOULOS G C,VLACHOS E. A hardware architecture for reconfigurable intelligent surfaces with minimal active elements for explicit channel estimation[C]// 2020 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing (ICASSP). Barcelona,Spain:IEEE, 2020:9175–9179. doi:10.1109/ICASSP40776.2020.9053976.
- [26] MISHRA D,JOHANSSON H. Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer[C]// 2019 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing (ICASSP). Brighton,UK:IEEE, 2019:4659–4663. doi:10.1109/ICASSP.2019.8683663.
- [27] ZHENG Beixiong,ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface-enhanced OFDM:channel estimation and reflection optimization[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020,9(4):518–522. doi:10.1109/LWC.2019.2961357.
- [28] WANG Peilan,FANG Jun,DUAN Huiping,et al. Compressed channel estimation for intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2020(27):905–909. doi:10.1109/LSP.2020.2998357.
- [29] HU Chen,DAI Linglong,HAN Shuangfeng,et al. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021,69(11):7736–7747. doi:10.1109/TCOMM.2021.3072729.
- [30] SHEN Decai,DAI Linglong. Dimension reduced channel feedback for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021,69(11):7748–7760. doi:10.1109/TCOMM.2021.3100428.
- [31] YANG Yifei,ZHENG Beixiong,ZHANG Shuowen,et al. Intelligent reflecting surface meets OFDM: protocol design and rate maximization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020,68(7):4522–4535. doi:10.1109/TCOMM.2020.2981458.
- [32] TAHA A,ALRABEIAH M,ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning[J]. IEEE Access, 2021(9):44304–44321. doi:10.1109/ACCESS.2021.3064073.
- [33] HUANG Chongwen,MO Ronghong,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. doi: 10.1109/JSAC.2020.3000835.
- [34] 徐汪洋. 基于深度学习的RIS辅助通信系统信道估计与波束赋形研究[D]. 成都:电子科技大学, 2023. (XU Wangyang. Deep learning-based channel estimation and beam-forming for RIS-assisted communication systems[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2023.)
- [35] 郭志恒,刘允,聂俊楠,等. MIMO场景下的低轨卫星选星算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023,21(5):608–612,638. (GUO Zhiheng,LIU Yun,NIE Junnan,et al. Satellite selection algorithm for Low Earth Orbit satellites in MIMO scenarios[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023,21(5):608–612,638.) doi:10.11805/TKYDA2020594.
- [36] BJÖRNSON E,WYMEERSCH H,MATTHIESEN B,et al. Reconfigurable intelligent surfaces:a signal processing perspective with wireless applications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2022,39(2):135–158. doi:10.1109/MSP.2021.3130549.
- [37] 李博江,李振东,陈文. 透射可重构超表面多天线通信系统[J]. 中兴通讯技术, 2022,28(3):36–39. (LI Bojiang,LI Zhendong,CHEN Wen. Multi-antenna communication system by transmissive reconfigurable meta-surface[J]. ZTE Technology Journal, 2022,28(3):36–39.) doi:10.12142/ZTETJ.202203006.

作者简介:

何俊岩(2000–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信 .email:947400824@qq.com.

刘子威(1989–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为卫星通信.

赖海光(1975–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信.

张更新(1967–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等.

赵鑫杰(1998–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为卫星通信.