



专题：6G 智能超表面

RIS 辅助的无线通信：原型验证与实测进展

杨辰泓，桑健，李潇，唐万恺，金石

(东南大学移动通信国家重点实验室，江苏 南京 210096)

摘要：智能超表面 (reconfigurable intelligent surface, RIS) 具备以低功耗、低成本提升通信传输速率的特点，被视为6G的关键技术之一，近年来受到广泛关注。综述了RIS辅助的无线通信系统的信道测量进展，介绍了时域和频域测量系统的大致原理，并对大尺度衰落模型、小尺度衰落模型和信道互易性的原型验证工作进行了总结。进而，综述了RIS硬件特性方面的测量进展，分析了有源RIS以及RIS的功耗、比特数和极化等特性。此外，总结了RIS覆盖增强的测量进展，介绍了RIS的部署位置、相位设计和信道的有效秩对覆盖增强性能的影响。最后，展望了RIS辅助无线通信原型验证与实际测量的未来研究方向和可能面临的挑战。

关键词：智能超表面；信道测量；硬件特性；覆盖增强

中图分类号：TN929.5

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024189

RIS-assisted wireless communications: prototype validation and measurement progress

YANG Chenhong, SANG Jian, LI Xiao, TANG Wankai, JIN Shi

National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

Abstract: In recent years, reconfigurable intelligent surface (RIS) is regarded as one of the promising technologies for 6G because of low power consumption, low cost and the ability to improve communication transmission rate. The progress in measurements for RIS-assisted wireless communication systems was reviewed, with the time-domain and frequency-domain measurement systems introduced. The prototype verification for large-scale fading models, small-scale fading models and channel reciprocity were summarized. Then, the advancements in measuring RIS hardware was reviewed, characteristics were concluded in power consumption, bit levels, polarization, and active RIS. Furthermore, the measurement on RIS coverage enhancement were summarized, introducing the impact of deployment locations, phase design, and effective rank on performance of coverage enhancement. Finally, future research directions and potential challenges faced by practical RIS measurements were discussed.

Key words: RIS, channel measurement, hardware characteristic, coverage enhancement

专题策划人：金石

收稿日期：2024-06-04；修回日期：2024-07-15

基金项目：国家自然科学基金资助项目 (No. 62231009)；江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20211511)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62231009), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No.BK20211511)



0 引言

5G的全面商用极大促进了互联网业务和物联网业务的发展,进一步赋能了工业、医疗、交通、传媒等多个领域。人工智能、虚拟现实、物联网等新一代信息技术的迅猛发展与广泛应用产生了大量数据传输需求,国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)预测,全球移动数据流量将在2030年达到每月5 ZB^[1]。同时,随着面向未来社会的新业务、新场景、新需求的不断涌现,智慧交通、智慧制造、智慧医疗等未来应用场景也在可靠性、传输带宽、时延等方面对通信网络提出了更高的挑战^[2]。为了满足未来移动通信网络日益增长的多样化需求,未来研究需要在传输技术和资源利用方面取得新的突破,因此,学术界及工业界已纷纷启动对6G的研究。

在众多候选技术中,智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)具有人为调控电磁传播环境的能力,被认为是6G的关键使能技术之一。RIS表面配备了大量可调谐的电磁单元,这些单元可以使用廉价的超材料来制作,能够以极低的功耗和成本主动调控电磁波。在本身不产生信号的前提下,电磁单元通过实时编程控制反射/透射信号以影响信道,从而有效扩大和提高通信系统的覆盖范围和传输速率^[3]。RIS的出现提高了无线通信系统的频谱效率、通信范围和容量,为无线通信系统的性能突破带来了新的研究方向,吸引了学者们的广泛关注。

RIS的引入为通信系统增加了发射机(Tx)-RIS-接收机(Rx)的虚拟视距(virtual line of sight, VLOS)链路,突破了传统无线通信中电磁无线传播环境的不可控性^[4],具有增大信号强度、扩大覆盖范围和增强通信链路稳定性的作用。目前,RIS辅助无线通信系统的建模分析及传输设计已经获得大量理论研究结果,如信道的确定性^[5-6]、统计性建模^[7-9]、盲区覆盖^[10]、传输

增强^[11-12]和信道定制^[13]等。然而,这些研究的落地应用需要在实际环境中测量验证的信道模型以及硬件特性来支撑,且需要原型验证来佐证和分析其设计的有效性。因此,本文综述了RIS原型验证与实测方面的研究进展,第一,RIS信道测量方面,测量系统可以分为时域和频域测量系统,目前大多数研究针对路径损耗(path loss, PL)和阴影衰落的测量,部分对小尺度衰落模型完成了测量验证,分析了信道互易性等;第二,RIS特性测量方面,对RIS功耗的研究迎合了通信领域对低成本RIS的需求,采用多比特RIS、双极化RIS或有源RIS辅助通信能够获得更好的系统性能;第三,RIS覆盖增强方面,现有研究对接收信号强度、信噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)、链路吞吐量等参数进行了测量和分析,并验证了可以通过优化RIS单元的相位设计、增大信道矩阵的有效秩和改变RIS的部署位置等方式提升覆盖性能。

1 信道测量

信道测量是指利用专用的信道探测设备获取信道的参数^[14]。目前,RIS信道测量系统主要包括时域和频域测量系统两类。时域测量系统架构如图1所示,时域测量系统可以测得信道冲激响应(channel impulse response, CIR),一般采用直接射频脉冲测量法或滑动相关测量法,即以脉冲信号或者伪噪声(pseudo-noise, PN)序列作为发送信号^[15],接收信号可以近似认为CIR。频域测量系统架构如图2所示,频域测量系统通过测量信道的频率响应间接获得CIR,一般基于矢量网络分析仪(vector network analyzer, VNA)测量信道的S参数,而后通过在不同的频段上测量信道的 S_{21} 参数得到该频段的信道复频率响应并存储至计算机,随后对复频率响应进行离散傅里叶逆变换(inverse discrete Fourier transform, IDFT)处理从而获得CIR^[16]。

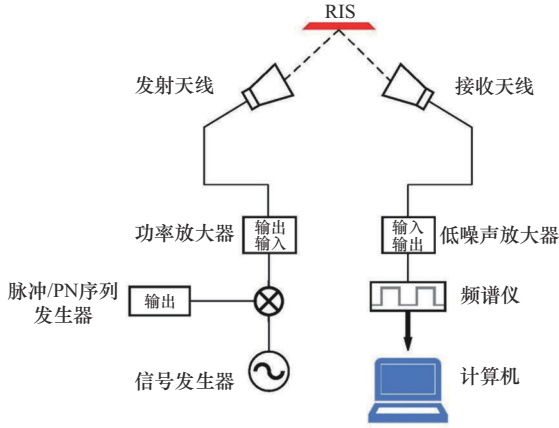


图1 时域测量系统架构

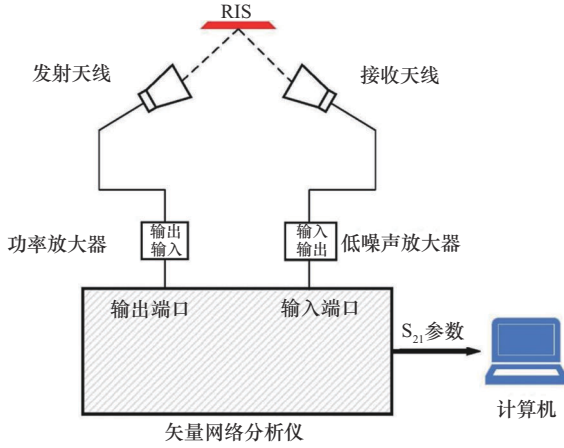


图2 频域测量系统架构

在无线通信领域的信道建模研究中，一般将电磁波的衰落分为大尺度衰落和小尺度衰落，大尺度衰落主要研究PL和阴影衰落等，小尺度衰落主要研究多径效应和多普勒效应等。RIS辅助的VLOS链路由两段信道级联而成，这意味着存在比从Tx到Rx的直射视距（line-of-sight, LOS）链路更高的PL。因此，RIS辅助无线通信系统中PL的大小是许多研究者关注的重点。RIS各参数示意图如图3所示，文献[17]从电磁学理论的角度，建立了RIS辅助无线通信系统的自由空间PL模型， $\theta_{n,m}^t$ 和 $\theta_{n,m}^r$ 分别为Tx和Rx到RIS单元的俯仰角， $\varphi_{n,m}^t$ 和 $\varphi_{n,m}^r$ 分别为Tx和Rx到RIS单元的方向角， $\theta_{n,m}^{tx}$ 和 $\theta_{n,m}^{rx}$ 分别为RIS单元到Tx和Rx的俯仰角， $\varphi_{n,m}^{tx}$ 和 $\varphi_{n,m}^{rx}$ 分别为RIS单元到Tx和Rx的方

向角。功率为 P_t 的信号由辐射方向图为 $F(\theta_{n,m}^{tx}, \varphi_{n,m}^{tx})$ 和天线增益为 G_t 的Tx发射，经单元增益为 G 的RIS反射，由辐射方向图为 $F(\theta_{n,m}^{rx}, \varphi_{n,m}^{rx})$ 和天线增益为 G_r 的Rx接收，则Rx的接收功率为：

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r G d_x d_y \lambda^2}{64\pi^3} \times$$

$$\left| \sum_{m=1-M/2}^{M/2} \sum_{n=1-N/2}^{N/2} \frac{\sqrt{F_{n,m}^{combine}} \Gamma_{n,m}}{r_{n,m}^t r_{n,m}^r} e^{\frac{-j2\pi(r_{n,m}^t + r_{n,m}^r)}{\lambda}} \right|^2 \quad (1)$$

其中， P_t 为发射信号功率， λ 为信号波长， M 和 N 表示RIS中单元的行数和列数， d_x 和 d_y 表示每个RIS单元的长和宽， $\Gamma_{n,m}$ 为RIS单元的反射系数， $r_{n,m}^t$ 和 $r_{n,m}^r$ 分别为RIS单元到Tx和Rx的距离， $F_{n,m}^{combine} = F(\theta_{n,m}^{tx}, \varphi_{n,m}^{tx}) F(\theta_{n,m}^t, \varphi_{n,m}^t) F(\theta_{n,m}^r, \varphi_{n,m}^r) F(\theta_{n,m}^{rx}, \varphi_{n,m}^{rx})$ 为RIS单元的辐射方向图。根据上述接收功率可计算出自由空间下RIS辅助无线通信系统的PL。除此之外，文献[17]分别在暗室中使用4.25 GHz和10.5 GHz工作频段下的3个RIS进行了实际测量，对比了不同的Tx和Rx到RIS的距离，验证了上述PL模型的正确性。在此基础上，文献[18]提出了更简洁的自由空间PL模型，并在暗室中对27 GHz和33 GHz频段RIS进行了实测，结果验证了改进后的PL模型的有效性，并且综合评估了RIS单元的散射性能、功耗和面积的关系。以上研究为低频段和高频段部署RIS的理论研究和实际测量奠定了基础。文献[19]综合考虑了从Tx到Rx的LoS径与RIS的辅助路径，提出了RIS辅助无线通信系统的双径传输模型，并测量了RIS处于镜面反射和智能反射状态下系统的接收功率，验证了模型的正确性并证明了RIS有缓解信道快速衰落、提升系统接收功率的作用。

文献[20]改进了传统的浮动截距（floating-

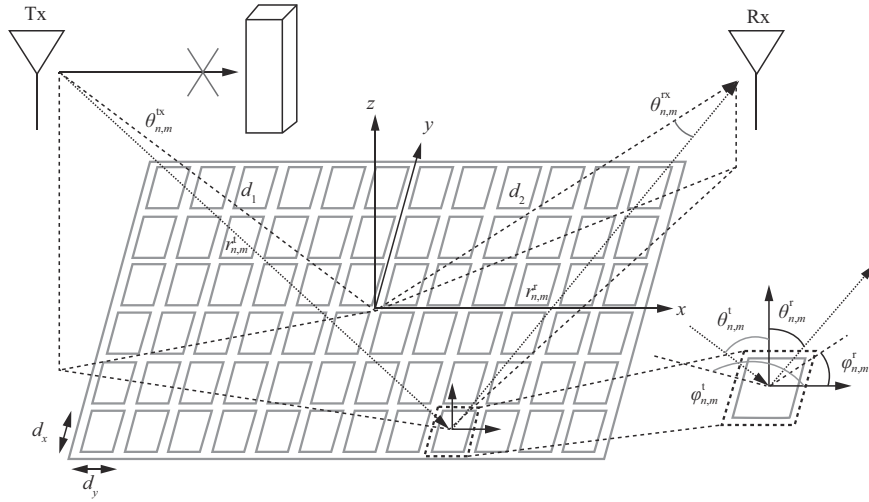


图3 RIS各参数示意图

intercept, FI) 模型与自由空间参考距离 (close-in free space reference distance, CI-FSRD) 模型 (简称 CI 模型), 提出式 (2) 与式 (3) 两种 PL 模型, 使其更加适配于真实传播环境下的 RIS 辅助无线通信信道:

$$L_{\text{path}}^{\text{FI}}(d_1, d_2) = \alpha + 10\beta_1 \lg d_1 + 10\beta_2 \lg d_2 + X_{\sigma}^{\text{FI}} \quad (2)$$

$$L_{\text{path}}^{\text{CI}}(d_1, d_2) = L_{\text{path}}(d_0^{(1)}, d_0^{(2)}) + 10n_1 \lg \frac{d_1}{d_0^{(1)}} + 10n_2 \lg \frac{d_2}{d_0^{(2)}} + X_{\sigma}^{\text{CI}} \quad (3)$$

其中, d_1 和 d_2 分别为 Tx-RIS 和 RIS-Rx 的距离, α 为 FI 模型的截距, β_1 、 β_2 、 n_1 、 n_2 为模型中 Tx-RIS 和 RIS-Rx 距离的 PL 指数 (path loss exponent, PLE), $d_0^{(1)}$ 和 $d_0^{(2)}$ 分别为 Tx-RIS 和 RIS-Rx 的参考距离, X_{σ}^{FI} 、 X_{σ}^{CI} 为标准差为 σ 的零均值高斯变量。文献[20]在室内的非视距 (non-line-of-sight, NLOS) 场景中, 采用频域测量系统对 2.6 GHz 频段下 Tx-RIS-Rx 的辅助路径进行了测量, 室内测量场景如图4所示, 对测得的 PL 数据采用上述模型进行了拟合, 结果表明, 上述模型

$$\text{PL}_{\text{CI}}^{\text{RIS}}(d_1, d_2, \theta_t, \theta_r) = \text{PL}_{\text{FS}}^{\text{RIS}}(d_0^{(1)}, d_0^{(2)}, \theta_0^t, \theta_0^r) +$$

$$10n_1 \lg \frac{d_1}{d_0^{(1)}} + 10n_2 \lg \frac{d_2}{d_0^{(2)}}$$

能很好地拟合实际信道 PL。文献[15]中介绍了 3 种 PL 模型, 包括一个加性模型和两个乘性模型, 并在室内走廊环境中测量了级联信道的 PL, 结果同样验证了式 (2) 的准确性, 说明 RIS 相对 Tx 和 Rx 的距离不是以相同的参数影响信道的 PL, 而是存在不同的影响因子。



图4 室内测量场景

在文献[20]的基础上, 文献[21]进一步改进了 FI 模型和 CI 模型, 提出了包含距离信息和角度信息的经验模型:

$$\text{PL}_{\text{FI}}^{\text{RIS}}(d_1, d_2, \theta_t, \theta_r) = \alpha + 10\beta_1 \lg d_1 + 10\beta_2 \lg d_2 - 10\lambda_1 \lg(\cos \theta_t) - 10\lambda_2 \lg(\cos \theta_r) + X_{\sigma}^{\text{FI}} \quad (4)$$

$$-10\mu_1 \lg \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_0^t} - 10\mu_2 \lg \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_0^r} + X_{\sigma}^{\text{CI}} \quad (5)$$

其中, α 、 β_1 、 β_2 、 n_1 、 n_2 、 d_1 、 d_2 、 $d_0^{(1)}$ 、 $d_0^{(2)}$ 、

X_{σ}^{FI} 和 X_{σ}^{CI} 定义同式 (2) 和式 (3), θ_t 和 θ_r 表示 Tx 和 Rx 到 RIS 中心的俯仰角, θ_0^t 和 θ_0^r 分别为 θ_t 和 θ_r 的参考角度, λ_1 和 λ_2 是 FI 模型中 θ_t 和 θ_r 的 PLE, μ_1 和 μ_2 是 CI 模型中 θ_t 和 θ_r 的 PLE。文献[21]在室外、室内和室外到室内 (outdoor-to-indoor, O2I) 3 种场景下进行了测量实验, 测量场景如图 4、图 5 和图 6 所示。该研究在每个场景中分别考虑使用智能反射 RIS (intelligent reflection with RIS, IRWR)、使用镜面反射 RIS (specular reflection with RIS, SRWR) 和不使用 RIS (without RIS, WR) 3 种传播模式, 基于 2 096 个测量点采集在 NLoS 信道中传播的信号, 验证了模型预测的准确性。此外综合比较和分析了 RIS 辅助信道的传播特性, 包括 PL、PLE、空间一致性、时间色散和频率平稳性等。

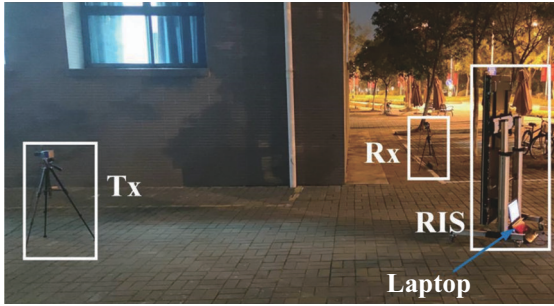


图5 室外测量场景



图6 室外到室内测量场景

文献[22]基于实际的信道测量数据, 针对收发端之间无 LOS 径的 RIS 辅助无线通信场景, 提出了小尺度衰落统计信道模型。综合考虑从 Tx 到 Rx 的直接路径与 Tx-RIS-Rx 的辅助路径, 将其 CIR 建模为:

$$h(t, \tau) = \sqrt{\frac{K(t)}{K(t) + 1}} h_{\text{LOS}}(t) \delta(t - \tau_{\text{LOS}}(t)) + \sqrt{\frac{1}{K(t) + 1}} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} h_{m,n}(t) \delta(t - \tau_m(t) - \tau_{m,n}(t)) + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^{Q_p} h_{p,q}(t) \delta(t - \tau_p(t) - \tau_{p,q}(t)) \quad (6)$$

其中, 第一项是 Tx-RIS-Rx 链路的 VLOS 分量, $K(t)$ 是莱斯因子, $h_{\text{LOS}}(t)$ 是 VLOS 分量的幅度, 而 $\tau_{\text{LOS}}(t)$ 是 VLOS 分量的时延; 第二项表示在 Tx-RIS 链路或 RIS-Rx 链路中散射产生的多径分量, 其中 M 和 N_m 分别为簇数和第 M 个簇中的路径数目, $\tau_m(t)$ 和 $\tau_{m,n}(t)$ 为第 m 个簇和第 m 个簇内第 n 条路径的时延, $h_{m,n}(t)$ 为第 m 个簇内第 n 条路径的幅度; 第三项表示 Tx-Rx 链路固有的直射分量, 其中 P 和 Q_p 分别为簇数和第 P 个簇中的路径数, $\tau_p(t)$ 和 $\tau_{p,q}(t)$ 为第 p 个簇和第 p 个簇内第 q 条路径的时延, $h_{p,q}(t)$ 为第 p 个簇内第 q 条路径的幅度。本文采用 2.6 GHz 频段的 RIS, 与文献[21]相同, 针对 IRWR、SRWR 和 WR 3 种传播模式, 在室外、室内和 O2I 3 种典型通信场景下进行了实测。经测量和研究分析, 本文提出的统计模型能够准确地表征小尺度衰落。文献[22]比较了 3 种传播模式下的 K 因子和时延色散, 从测量数据中不难看出, 与其他传播模式相比, IRWR 传播模式在室内、室外和 O2I 场景下的 K 因子均为最大, 均方根时延扩展均为最小, 说明该模式可以集中信号能量, 减弱时延色散。

互易性指当信号发射源与观测者互换位置时, 信号源在观测者位置产生的电磁波保持不变的性质, 具体到无线通信领域的信道互易性是指 Tx 到 Rx 的无线信道与 Rx 到 Tx 的无线信道相同。文献[23]针对 RIS 辅助时分双工 (time division duplex, TDD) 无线通信系统展开研究, 根据 Rayleigh-Carson 定理的前提条件, 提出满足介电常数张量和磁导率张量恒等, 即可满足信道互易



性。该研究认为大多数 RIS 辅助的通信系统都可以满足信道互易性，并通过对 4.25 GHz 和 27 GHz 频段下 RIS 的实际测量进行了佐证。另外还补充说明了 3 种信道非互易性的情况，包括 RIS 使用有源非互易电路结构、时变控制信号和非线性不对称结构。文献[24]基于美国国家仪器（National Instruments, NI）公司的通用软件无线电外设（universal software radio peripheral, USRP）平台针对 5.8 GHz 的 RIS 进行了室内和室外实验，实验采用频域测量系统进行了简单的信道互易测试。

RIS 辅助无线通信信道测量实验总结见表 1，对比展示了不同工作中的测量频率、测量场景、测量系统和测量结果等信息。总体来说，RIS 的实际测量实验不仅验证了大尺度衰落和小尺度衰落等理论及经验模型，并且初步展示了 RIS 在多种应用场景的有效性。

2 RIS 特性测量

RIS 由大量低成本的元件构成，包括金属、介质和可调节元件。其中可调节元件具备调节电磁波相位幅度和极化的能力，常用于 PIN 二极管、变容二极管和射频（radio frequency, RF）开关等。部分文献展开了对 RIS 本身硬件特性的

测量和研究，主要集中在功耗、RIS 单元比特数、RIS 单元极化方式和有源 RIS 等方面。

低功耗是 RIS 的一大关键特性，文献[17, 24-29]对 RIS 的功耗进行了理论分析和测量。其中文献[28]将 RIS 的功耗建模为静态功耗和单元功耗，静态功耗包括 FPGA 控制板和驱动电路的功耗。该研究针对不同材质的 RIS 提出了不同的功耗模型，并在实际环境下测量了 5 种不同材质及精度的 RIS，验证了该功耗模型的准确性。测量结果表明，以变容二极管为可调元件的 RIS，动态功耗可以忽略不计；以 RF 开关为可调元件的 RIS，动态功耗与单元数量成正比，而与其单元配置无关；以 PIN 二极管为可调元件的 RIS，动态功耗与 RIS 单元的极化方式、分辨率、工作状态有关：

$$P_{\text{units}} = \sum_{i=1}^T P_{i,v}(B_{i,v}, b_{i,v}) + \sum_{i=1}^T P_{i,h}(B_{i,h}, b_{i,h}) \quad (7)$$

其中， T 为 RIS 单元的数量， $P_{i,x}(B_{i,x}, b_{i,x})$ 表示分辨率为 $B_{i,x}$ 的单元在 x 偏振方向上的功耗，可表示为：

$$P_{i,x}(B_{i,x}, b_{i,x}) = b_{i,x} \cdot P_{\text{PIN}} \quad (8)$$

其中， $b_{i,x}$ 为编码为“1”的单元个数， P_{PIN} 为编码为“1”时 PIN 二极管的功耗。以 PIN 二极管为可调元件的 RIS，可通过减少 RIS 单元中编码为“1”的单元形成低功耗 RIS 编码设计。该模型为

表 1 RIS 辅助无线通信信道测量实验总结

参考文献	频率/GHz	场景	测量系统	实验结果
[15]	26.00	室内走廊	时域	验证了 PL 的乘性关系
[17]	4.25、10.50	暗室	频域	提出并验证 RIS 辅助无线通信系统的自由空间 PL 模型
[18]	27.00、33.00	暗室、室内	频域	改进并验证 RIS 辅助无线通信系统的自由空间 PL 模型
[19]	35.00	室内	频域	提出并验证 RIS 辅助无线通信系统的双径传输模型
[20]	2.60	室内走廊	频域	改进并验证 FI 模型和 CI 模型，分析信道的 PL 和阴影衰落
[21]	2.60	室内、室外、室外到室内	频域	提出并验证包含距离和角度信息的 FI 模型和 CI 模型，分析 RIS 辅助信道 PL、PLE、空间一致性、时间色散和频率平稳性
[22]	2.60	室内、室外、室外到室内	频域	提出并验证 RIS 辅助无线通信系统的小尺度衰落统计信道模型
[23]	4.25、27.00	室内	频域	验证 RIS 辅助时分双工无线通信系统的信道互易性，分析满足/违背信道互易性的条件
[24]	5.80	暗室、室内、室外	NI USRP	验证互易性等

未来 RIS 辅助无线通信系统的低功耗设计方法提供了参考。文献[29]将 RIS 的功耗建模为静态功耗和动态功耗，并将动态功耗定义为 RIS 码本切换导致的功率消耗，静态功耗则为码本配置完成后的工作功耗，而后测量了 3.5 GHz 频段下 2 比特 RIS 的功耗，对测得的静态功耗和动态功耗数据进行了拟合。测量结果表明，其定义的 RIS 静态功耗随 PIN 二极管导通比例增大而线性增大，动态功耗随码本转换频率的增大而线性增大。

目前大多数 RIS 实验测试平台仅考虑了 1 比特 RIS 单元设计，主要原因是与高分辨率 RIS 单元相比，1 比特 RIS 单元的复杂度较低，配置开销小，成本投入相对较低。然而，文献[30]认为当天线位于 RIS 的辐射近场之外并且在同一水平面上时，采用 1 比特 RIS 更容易产生杂散波束，从而浪费传输功率并可能对附近的用户设备造成干扰，而使用多比特 RIS 辅助通信，能够提供更高的相位分辨率。该研究在大厅、走廊和不同楼层 3 种场景下，测量了 sub-6 GHz 频段多比特 RIS 的辅助通信性能。实测结果证明，与 1 比特 RIS 相比，3 比特 RIS 的功率增益提高了 2.65 dB。

双极化 RIS 表面的单元可以独立调节两个正交极化的电磁波相位，具有更高的偏振自由度。这一特性使得基于双极化 RIS 的传输系统在提高分集度方面具备一定潜力。文献[31]提出了一种基于双极化 RIS 的多输入多输出（multiple-input multiple-output, MIMO）传输系统架构，为实现

低成本超大规模 MIMO 提供了解决方案。基于双极化 RIS 的正交幅度调制（quadrature amplitude modulation, QAM）和 MIMO 方案，构建了 2×2 的 MIMO-QAM 原型系统，并在实测实验中证明该方案可以同时实现两个视频流的实时传输。该研究还阐述了双极化 RIS 的潜在问题，即极化信号耦合可能会导致系统性能下降。

早期在针对 RIS 辅助无线通信的研究中考虑 RIS 单元一般不具备放大信号的能力，只改变反射信号的相位。文献[32]中提出了有源 RIS 和无源 RIS 的概念，无源 RIS 一般不放大反射信号，而有源 RIS 可以通过集成的放大器来放大反射信号。在一些发送端和接收端之间直接 LOS 径较强的场景中，无源 RIS 实现的容量增益有限。该研究设计了基于有源 RIS 元件的信号模型，在 2.36 GHz 频段下进行了实试验证。研究结果表明，与无 RIS 的场景相比，无源 RIS 在典型应用场景下能实现 22% 左右的和速率增益，而有源 RIS 可以实现约 130% 的和速率增益。RIS 特性测量实验总结见表 2。

3 覆盖增强

随着 5G 的大规模部署和商用，传统的覆盖增强技术因硬件成本高、功耗大等问题面临严峻挑战。RIS 可以以较低成本提升信号传输速率的特征，使其成为潜在的 6G 使能技术之一。文献[33-34]在室内的 L 形走廊中测量了 5.2 GHz 频

表 2 RIS 特性测量实验总结

参考文献	频率/GHz	测量特性	实验结果
[28]	3.50、35.00、2.60、9.50、3.20	功耗	提出 RIS 的功耗分为静态功耗和单元功耗，测量不同材质 RIS 的功耗
[29]	3.50	功耗	提出 RIS 的功耗分为静态功耗和动态功耗。RIS 的静态功耗随 PIN 二极管导通比例增大而线性增大，动态功耗随码本转换频率的增大而线性增大
[30]	3.75	RIS 单元比特数	提出具有 7 种不同相移的多比特 RIS 设计，在大厅、走廊和不同楼层的室内通信场景中验证多比特 RIS 能够提升系统接收功率。
[31]	2.70	RIS 单元极化	提出一种基于 RIS 的 MIMO 传输架构，建立并验证基于双极化 RIS 的 MIMO 传输系统原型
[32]	2.36	有源 RIS	提出有源 RIS 的概念，建立并验证基于自制有源 RIS 单元的有源 RIS 信号模型



段 RIS 的覆盖增强效果，通过改变天线相对 RIS 中心的角度、天线与 RIS 中心的距离，测量了多组参数的信号功率值，证明了 RIS 在室内环境中具有增强信号覆盖和提供物理层安全性（physical layer security, PLS）的作用。同时，提出了一种将 RIS 单元分组以寻找 RIS 最佳相位配置的方案，并通过室内环境下的测量验证了方案的有效性。实验结果表明，该方案在牺牲少量接收信号功率的条件下，大幅减少了训练搜索 RIS 相位配置码本的时间。文献[35]选取了高塔下阴影区、室内阴影区和室外建筑阴影区 3 个场景，在某市区研究了 RIS 部署在 5G 商用网络中的覆盖增强效果。实测中 RIS 采用将波束对准其覆盖区域中心位置的固定相位的方法，在不同场景下测量系统的参考信号接收功率（reference signal receiving power, RSRP）、信噪比以及下行链路吞吐量。实测数据显示，在高塔下阴影区的小区用户平均 RSRP 增益为 3.8 dB，平均吞吐量大约提高了 19%；在室内阴影区，RSRP、SINR 和吞吐量的平均增益分别为 9.9 dB、2.87 dB 和 78.61 Mbit/s；在室外建筑阴影区，RSRP、SINR 和吞吐量的平均增益分别为 3.3 dB、1.45 dB 和 79 Mbit/s。以上测量结果表明，RIS 的部署显著提升了系统性能和用户通信质量。文献[36]中采用盲波束成形的动态 RIS 相位设计算法，搭建了基于 RIS 的 5G 商用网络覆盖增强原型系统，在某高校校区选择了 2.6 GHz 频段的两个 5G 弱覆盖区域进行了测量实验。测量结果显示，原型系统在两个测量场景下的接收功率增益为 6.1 dB 和 4 dB，RIS 的部署为 5G 商用网络带来的接收信号功率提升作用明显。以上实验对室内、室外环境下 RIS 的接收信号功率增强效果进行了测量和比较，未来可以着眼于其他指标的测量以研究 RIS 对通信系统的影响。

在实际通信场景下，往往将 RIS 部署在各类物体的表面，而 RIS 的具体部署位置将直接影响

其覆盖增强性能。为达到最小化室内通信中断概率的目的，文献[37]提出了一种基于人类移动模型的室内 RIS 部署策略，其仿真结果验证了该部署策略能够消除人为干扰对室内毫米波信号覆盖的影响，但缺乏实际测量结果的佐证。文献[38]提出了一种 RIS 辅助无线通信系统的 RIS 部署策略，研究针对室内办公室、室外高建筑以及狭长走廊 3 种场景，在 35 GHz 的频段测量验证了该部署策略的准确性。该研究表明，使系统接收功率最大的 RIS 位置并不总是靠近 Tx 或 Rx，而是取决于 Tx-Rx 的距离与 RIS 到 Tx-Rx 连线的距离。具体地，当 Tx-Rx 的距离大于 RIS 到 Tx-Rx 距离的两倍时，RIS 的最优部署位置在 Tx 或 Rx 附近；当 Tx 到 Rx 的距离小于或等于 RIS 到 Tx-Rx 距离的两倍时，RIS 最优部署位置在 Tx-Rx 连线的中轴线附近。

RIS 表面是由大量亚波长单元构成的，对 PIN 二极管等可调元件的实时电压控制赋予了 RIS 电磁特性实时可编程的特点，即 RIS 可以通过改变幅度、相位等参数调控电磁波，从而改进整个通信系统的性能。先进的 RIS 辅助通信系统往往依赖其电磁单元的相位设计，优秀的 RIS 单元相位设计方法有助于提升通信系统性能。早期工作多对 RIS 的连续相位设计进行研究，例如，文献[17-18]提出了基于自由空间 PL 模型计算 RIS 连续相位的方法。然而，实际应用场景下 RIS 单元相位为若干离散值。因此，文献[19,24,39-42]研究了 RIS 的离散相位设计问题，均采用固定阈值对连续相位进行量化的传统离散相位设计方法。文献[43]进一步研究了 RIS 辅助单输入单输出（single-input single-output, SISO）系统中的相位量化问题，提出了动态阈值相位量化（dynamic threshold phase quantization, DTPQ）方法和等间隔相位量化（equal interval phase quantization, EIPQ）方法来优化 RIS 离散相移，从而实现相位对准以增强覆盖性能。同时，利用 2.6 GHz

和 35 GHz 的 RIS 进行实际测量，验证了提出的两种编码方式对系统的功率增益、稳定性和鲁棒性均有提升作用。

针对 RIS 辅助 MIMO 系统，文献[13, 44]研究了通过对 RIS 相位进行优化设计以增强信道的有效秩，从而提升覆盖增强性能的方法。文献[45]设计了 RIS 辅助的 MIMO 无线通信模型，并提出一种 MIMO 信道的有效秩优化方法，通过对 2×2 的 RIS 辅助 MIMO 通信系统进行实际测量，验证了该方法能够提高信道有效秩和系统可达速率。该研究为 RIS 辅助的 MIMO 通信系统提供了另一种可行的设计思路。覆盖增强实验总结见表 3。

4 未来研究前景和挑战

在 RIS 辅助的无线通信测量与验证方面，目前的研究大多是针对信道大尺度衰落特性的测量分析，对 RIS 硬件特性的测量与建模工作鲜有报道。RIS 在可调元件的选取上存在差别，不同的硬件设计在功耗、比特数、极化等方面具备不同的特性，且 RIS 硬件也可能存在幅相耦合、极化耦合、单元相关等非理想特性，进而导致其具备不同的覆盖增强性能。深入分析和测量其硬件特性有助于设计出性能更优的 RIS，从而用其指导实际应用场景下 RIS 硬件以及相位设计方法的选取。

在信道测量方面，当前研究主要着眼于单个 RIS 辅助的无线通信系统，但由于 RIS 一般被部署在固定的位置上，如安装在建筑物表面等处，因此单个 RIS 辅助无线通信系统的覆盖范围和性能增益有限。为了实现更高性能的传输与更大范围的信号覆盖，未来需要进一步研究部署多个 RIS 的信道模型并开展实际测量工作。与单个 RIS 辅助的系统模型不同，复杂通信网络中部署的多个 RIS 间可能存在信息交互与联合设计。因此，这涉及如何精确评估多个 RIS 协同作用的工作模式，以及如何优化 RIS 之间的相互作用，并需要大量的测量工作支撑理论分析。

5 结束语

本文综述了 RIS 辅助无线通信系统的最新实验进展情况，包含 RIS 信道测量、特性测量和覆盖增强测量 3 个部分。在信道测量方面，介绍了时域和频域测量系统的大致原理，着重总结了 RIS 辅助信道的大尺度和小尺度衰落模型的测量验证实验，部分研究验证了信道的互易性。在 RIS 特性测量部分，着重关注 RIS 的几个硬件特性的测量进展，包括功耗、比特数、极化、有源放大等特性。在覆盖增强部分，当前研究从系统的 PL、信噪比和链路吞吐量等角度评估了 RIS 的覆盖增强性能，总结了部署位置、编码方式、信道有效秩等因素对 RIS 覆盖增强效果的影响。最

表 3 覆盖增强实验总结

参考文献	频率/GHz	场景	测量平台	实验结果
[33, 34]	5.20	室内走廊	SDR 原型验证平台	证明 RIS 有增强信号覆盖和提供 PLS 的能力
[35]	2.60	高塔下阴影区、室内阴影区、室外建筑阴影区	5G 商用网络	证明部署 RIS 使系统的 RSRP、SINR 以及下行链路吞吐量提升
[36]	2.60	室外	5G 商用网络	搭建了基于 RIS 的 5G 商用网络覆盖增强原型系统，接收信号功率增强明显
[38]	35.00	室内办公室、室外高建筑以及狭长走廊	频域原型验证平台	提出并验证 RIS 部署策略
[43]	2.60、35.00	室外	频域原型验证平台	证明 DTPQ 和 EIPQ 方法能够提升系统的功率增益、稳定性和鲁棒性
[45]	2.70	室内	SDR 原型验证平台	提出并验证 RIS 辅助 MIMO 系统的秩优化方法



后从 RIS 特性测量和多 RIS 系统测量的角度，对未来 RIS 测量的研究前景做了展望。

参考文献：

- [1] TARIQ F, KHANDAKER M R A, WONG K K, et al. A speculative study on 6G[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(4): 118-125.
- [2] 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.
- [3] DI RENZO 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.
- [4] LIU Y W, LIU X, MU X D, et al. Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(3): 1546-1577.
- [5] ZHANG J, ZHOU Z, ZHANG Y, et al. A deterministic channel modeling method for RIS-assisted communication in sub-THz frequencies[C]//2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Florence: EurAAP, 2023: 561-565.
- [6] GRADONI G, DI RENZO M. End-to-end mutual coupling aware communication model for reconfigurable intelligent surfaces: an electromagnetic-compliant approach based on mutual impedances[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(5): 938-942.
- [7] WANG F, WANG X, LI X, et al. Ring-type codebook design for reconfigurable intelligent surface near-field beamforming [C]//Proceedings of the 2022 IEEE 33rd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 391-396.
- [8] JIANG H, XIONG B P, ZHANG H M, et al. Hybrid far- and near-field modeling for reconfigurable intelligent surface assisted V2V channels: a sub-array partition based approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8290-8303.
- [9] BASAR E, YILDIRIM I, KILINC F. Indoor and outdoor physical channel modeling and efficient positioning for reconfigurable intelligent surfaces in mmWave bands[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8600-8611.
- [10] LI X, JIANG L L, LUO C H, et al. RIS-enhanced multi-cell downlink transmission using statistical channel state information[J]. *Science China Information Sciences*, 2023, 66(11): 212301.
- [11] FENG K M, LI X, HAN Y, et al. Joint beamforming optimization for reconfigurable intelligent surface-enabled MISO-OFDM systems[J]. *China Communications*, 2021, 18(3): 63-79.
- [12] FENG K M, WANG Q S, LI X, et al. Deep reinforcement learning based intelligent reflecting surface optimization for MISO communication systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 745-749.
- [13] CHEN W C, WEN C K, LI X, et al. Channel customization for joint tx-RISs-rx design in hybrid mmWave systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8304-8319.
- [14] ZHANG J H, TANG P, TIAN L, et al. 6 - 100 GHz research progress and challenges from a channel perspective for fifth generation (5G) and future wireless communication[J]. *Science China Information Sciences*, 2017, 60(8): 080301.
- [15] LI Y, ZHANG J H, TANG P, et al. Path loss modeling for the RIS-assisted channel in a corridor scenario in mmWave bands [C]//Proceedings of the 2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1478-1483.
- [16] EL-ABSI M, ABBAS A A, TUBAIL D, et al. Path loss modeling of RFID backscatter channels with reconfigurable intelligent surface: experimental validation[J]. *IEEE Access*, 2023(11): 108532-108543.
- [17] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, 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.
- [18] TANG W K, CHEN X Y, CHEN M Z, et al. Path loss modeling and measurements for reconfigurable intelligent surfaces in the millimeter-wave frequency band[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2022, 70(9): 6259-6276.
- [19] ZHOU R Y, CHEN X Y, TANG W K, et al. Modeling and measurements for multi-path mitigation with reconfigurable intelligent surfaces[C]//Proceedings of the 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [20] GAO B N, LI J C, YU Z X, et al. Propagation characteristics of RIS-assisted wireless channels in corridors: measurements and analysis[C]//Proceedings of the 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 550-554.
- [21] SANG J, ZHOU M Y, LAN J F, et al. Multi-scenario broadband channel measurement and modeling for sub-6 GHz RIS-assisted wireless communication systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(6): 6312-6329.

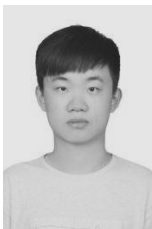
- [22] SANG J, LAN J F, ZHOU M Y, et al. Measurement-based small-scale channel model for sub-6 GHz RIS-assisted communications[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, PP(99): 1-6.
- [23] TANG W K, CHEN X Y, CHEN M Z, et al. On channel reciprocity in reconfigurable intelligent surface assisted wireless networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2021, 28(6): 94-101.
- [24] PEI X L, YIN H F, TAN L, et al. RIS-aided wireless communications: prototyping, adaptive beamforming, and indoor/outdoor field trials[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(12): 8627-8640.
- [25] ZAPPONE A, DI RENZO M, SHAMS F, et al. Overhead-aware design of reconfigurable intelligent surfaces in smart radio environments[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 126-141.
- [26] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(8): 4157-4170.
- [27] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results[J]. *IEEE Access*, 2020(8): 45913-45923.
- [28] WANG J H, TANG W K, LIANG J C, et al. Reconfigurable intelligent surface: power consumption modeling and practical measurement validation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024(99): 1.
- [29] ZHANG S, SUN H R, YU R Z, et al. RIS-aided communications at 3.5GHz: some insights from practical measurement results[C]//*Proceedings of the 2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [30] RAINS J, UR REHMAN KAZIM J, TUKMANOV A, et al. High-resolution programmable scattering for wireless coverage enhancement: an indoor field trial campaign[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, 71(1): 518-530.
- [31] CHEN X Y, KE J C, TANG W K, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(10): 2155-2159.
- [32] ZHANG Z J, DAI L L, CHEN X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: which will prevail in 6G?[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(3): 1707-1725.
- [33] KAYRAKLIK S, YILDIRIM I, HOKELEK I, et al. Indoor measurements for RIS-aided communication: practical phase shift optimization, coverage enhancement, and physical layer security[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024(5): 1243-1255.
- [34] KAYRAKLIK S, YILDIRIM I, GEVEZ Y, et al. Indoor coverage enhancement for RIS-assisted communication systems: practical measurements and efficient grouping[C]//*Proceedings of the ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*. Piscataway: IEEE Press, 2023: 485-490.
- [35] SANG J, YUAN Y F, TANG W K, et al. Coverage enhancement by deploying RIS in 5G commercial mobile networks: field trials[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2024, 31(1): 172-180.
- [36] LI J C, GAO B N, YU Z X, et al. Coverage enhancement of 5G commercial network based on reconfigurable intelligent surface [C]//*Proceedings of the 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*. Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [37] QIN H, LIU Z, YANG C C. Indoor mm-Wave coverage enhancement: reconfigurable intelligent surface deployment strategy based on human mobility model[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(10): 2475-2479.
- [38] REN Y Q, ZHOU R Y, TENG X K, et al. On deployment position of RIS in wireless communication systems: analysis and experimental results[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(10): 1756-1760.
- [39] GROS J B, POPOV V, ODIT M A, et al. A reconfigurable intelligent surface at mmWave based on a binary phase tunable metasurface[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021(2): 1055-1064.
- [40] TRICHOPOULOS G C, THEOFANOPOULOS P, KASHYAP B, et al. Design and evaluation of reconfigurable intelligent surfaces in real-world environment[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2022(3): 462-474.
- [41] WAN X, XIAO Q, ZHANG Y Z, et al. Reconfigurable sum and difference beams based on a binary programmable metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(3): 381-385.
- [42] LI Y H, BETTINGA S, EISENBEIS J, et al. Beamsteering for 5G mobile communication using programmable metasurface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(7): 1542-1546.
- [43] SANG J, LAN J F, ZHOU M Y, et al. Quantized phase alignment by discrete phase shifts for reconfigurable intelligent surface-assisted communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(4): 5259-5275.
- [44] ROY O, VETTERLI M. The effective rank: a measure of effective



tive dimensionality[C]//Proceedings of the 2007 15th European Signal Processing Conference. Piscataway: IEEE Press, 2007: 606-610.

- [45] MENG S G, TANG W K, CHEN W C, et al. Rank optimization for MIMO channel with RIS: simulation and measurement[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024, 13(2): 437-441.

[作者简介]



杨辰泓 (2000-), 男, 东南大学信息科学与工程学院硕士生, 主要研究方向为智能超表面辅助无线通信系统的建模与测量。



桑健 (1995-), 男, 东南大学信息科学与工程学院博士生, 主要研究方向为智能超表面辅助无线通信系统的信道测量、信道建模和编码设计。



李潇 (1982-), 女, 博士, 东南大学青年首席教授、博士生导师, 国家级高层次人才, 江苏省自然科学基金杰出青年基金及全国百篇优秀博士学位论文获得者。主要研究方向为大规模MIMO、智能超表面辅助通信、智能通信等。



唐万恺 (1988-), 男, 博士, 东南大学副研究员、博士生导师, 主要研究方向为智能超表面无线通信。



金石 (1974-), 男, 博士, 东南大学首席教授、博士生导师, 国家级高层次人才。主要研究方向为智能超表面辅助通信、智能通信、通信感知一体化等。