

# 智能反射面辅助的无线通信系统波束赋形及智能反射面相移技术综述

邢智童<sup>①</sup> 李云<sup>\*①②</sup> 吴广富<sup>①②</sup> 夏士超<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(重庆邮电大学计算机科学与技术学院 重庆 400065)

**摘要:** 自2020年5G设备开始大规模商用部署后,全球业界已经开始了6G技术的研究。在5G/6G时代,通信系统需要适应更加复杂的信道环境,如超高密度的城市环境、远海、沙漠、森林等地域。因此,如果能够有一种低能耗的方式,对无线通信信道进行自适应的调整和重构,将不仅有助于无线通信设备向传输时延更低、传输速率更快、接收能力更强等方面进一步迈进,而且可以帮助无线通信设备更好地部署于复杂信道环境的地域。智能反射面(IRS)被认为是实现信道环境重构的一种有效的设备。这些IRS设备大多是无源设备,因此,不会带来过多的能耗。当IRS与单输入单输出(SISO)、多输入单输出(MISO)、多输入多输出(MIMO)等技术相结合时,将进一步提高无线通信传输的传输速率、降低无线通信的能耗、增强无线通信设备对复杂信道环境的适应性。该文对IRS辅助的SISO,MISO和MIMO系统的信号传输模型进行系统总结,分析了IRS辅助的SISO,MISO和MIMO的信号传输建模方式,并对IRS辅助的SISO,MISO和MIMO系统的波束赋形和相移技术进行了综述。

**关键词:** 智能反射面; 波束赋形; 相移技术; 信号传输

中图分类号: TN919.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2026)02-0697-16

DOI: 10.11999/JEIT250790

CSTR: 32379.14.JEIT250790

## 1 引言

随着5G全面商用和6G研究的启动,未来网络需在复杂环境下(如远海、沙漠、高密度城区)实现全域覆盖与高可靠连接。6G新业务(如沉浸式通信、大规模机器互联)面临两大挑战:一是TB级数据洪流<sup>[1,2]</sup>需更高频段,但短波长电磁波易受遮挡,波束管理成为关键;二是海量异构终端导致信道复杂化。智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)通过无源重构信道环境,成为解决上述难题的有效手段。IRS通过无源相位调控提升覆盖能力,尤其适用于边缘用户,具有低功耗、高可控性等优势<sup>[3,4]</sup>。与传统反射材料不同,IRS能主动调控波程差,抑制小尺度衰落,实现信道重构<sup>[5-8]</sup>。

IRS具备可移动、快速部署的特性,在6G时代可为多种场景下提供灵活的通信支持,例如:为密集区域(如商圈、景区)进行覆盖补盲;在应急通信中作为基站与灾区间的链路中继;实现远洋设备与岸基的远程连接;以及提升蜂窝网络边缘用户的通信质量。

IRS技术可以有效地应用于单输入单输出(Single Input and Single Output, SISO)、多输入单输出(Multiple Input and Single Output, MISO)以及多输入多输出(Multiple Input and Multiple Output, MIMO)等方面。在SISO场景中,如果有效利用IRS的相移技术,可以保证信号的收发两端的吞吐量进一步提升。在MISO, MIMO场景中,如果能够将相移技术和波束赋形联合优化,将有助于提高所有用户的信息速率。

本文对IRS辅助的SISO技术、MISO技术和MIMO技术的波束赋形和对应的相位优化技术进行了综述。第一,分析了IRS的基本结构,研究了IRS技术的相关优点。第二,对IRS辅助的SISO, MISO和MIMO系统的信号传输模型进行了总结。第三,对IRS辅助的SISO, MISO和MIMO系统的波束赋形和相移技术进行了综述。本质上,IRS辅助的SISO, MISO和MIMO系统的波束赋形和相移技术的研究是基于信号传输模型,将需要优化的性能作为优化目标,将需要满足的条件作为约束条件,建立优化问题模型,求解相应的波束赋形向量和相移矩阵。在进行综述的时候,本文对所有的IRS辅

收稿日期: 2025-08-25; 改回日期: 2025-11-03; 网络出版: 2025-11-13

\*通信作者: 李云 [liyun@cqupt.edu.cn](mailto:liyun@cqupt.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金(62301100), 重庆市教委科学技术研究计划项目青年项目(KJQN202200606, KJQN202300638), 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0210, CSTB2024NSCQ-QCXM0063, CSTC2024YCJH-BGZXM003), 重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2025NSCQ-LZX0053)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62301100), The Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission Youth Project (KJQN202200606, KJQN202300638), Chongqing Natural Science Foundation (CSTB2024NSCQ-MSX0210, CSTB2024NSCQ-QCXM0063, CSTC2024YCJH-BGZXM003), Chongqing Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund (CSTB2025NSCQ-LZX0053)

助的SISO, MISO和MIMO系统的波束赋形和相移技术, 根据优化目标中的最小化功耗优化、最大化能效优化、最大化和速率优化和最大化公平通信速率优化进行分类, 分别将其研究思路进行综述。

## 2 系统结构与信号传输模型

### 2.1 IRS基本结构

如图1所示为IRS的基本结构。IRS从里到外有3层基本的结构, 其采用的是分层堆叠的设计理念。其最上层为智能控制层, 由集成化电路板构成, 并与IRS的控制器相连, 负责向底层的IRS反射单元发送相应的参数调控指令最终实现反射信号的相位调控。底层IRS反射单元需要调控的参数包括电容、电阻、电感等; 中间层为金属接地层, 一般采用高导电性的铜板或其他金属板, 它的作用是防止信号穿透IRS的反射表面, 从而造成信号的衰减; 最下层则为核心的功能实现层, 由大量按二维阵列排布的反射单元组成, 这些单元根据接收到的指令动态改变其电磁响应, 从而实现对接入无线信号的精确反射与波束导向。这3层结构紧密耦合, 共同将静态的金属表面转化为可编程的电磁环境。

IRS的本质是利用的电磁波的干涉原理。让接收终端不仅可以收到发送终端发送过来的直射信号, 还可以收到发送终端经过IRS反射过来的信号。当反射信号和直射信号的波程差取不同的值时, 相应的接收端收到的信号能量的强弱也会随之改变。波程差指的是电磁波因为传输路径的不同, 导致发送端到接收端走的路程不同, 这样的路程差异会直接转化为相位差, 记作

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L \quad (1)$$

其中,  $\Delta L$ 为波程差。IRS的反射单元通过动态调整反射相位(例如利用可调谐元件或微结构设计), 人为引入相位补偿, 从而改变反射波的波前。这种调控本质上等效于主动创造所需的波程差。IRS波束赋形的本质是通过协调多个反射单元的相位, 使反射波在特定方向相干增强(类似相控阵原理)。例

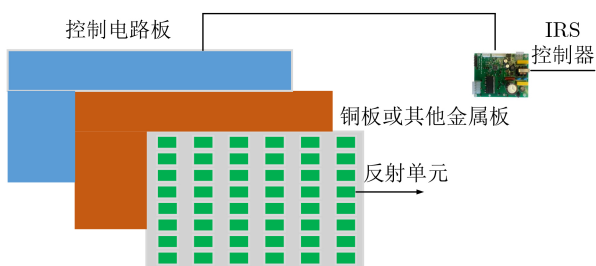


图1 IRS的基本结构图

如, 假设目标方向需要的波程差和对应的相位差如式(1)所示。在实际部署的时候, 实际的反射路径和直射路径的波程差为 $\Delta L'$ , 此时, 实际的相位差为

$$\Delta\Phi' = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta L' \quad (2)$$

因此, IRS的单元相差需要设定为

$$\Delta\varphi = \Delta\Phi - \Delta\Phi' \quad (3)$$

### 2.2 IRS系统信号传输模型

如图2所示为IRS辅助的SISO系统信号传输示意图。假设发送端需要向接收端发送的信号为 $\mathbf{x}_0$ , 发送端到第 $n$ 个IRS反射单元的信号乘性干扰为 $\mathbf{h}_n$ , 第 $n$ 个反射单元到接收端的乘性干扰为 $\mathbf{g}_n$ , 发送端到接收端的直射乘性干扰为 $\mathbf{h}_d$ , 假设IRS的第 $n$ 个反射单元的相位旋转矩阵为 $\Phi_n$ 。此时, 接收端得到的信号为

$$\begin{aligned} E &= \mathbf{h}_d \mathbf{x}_0 + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_n \mathbf{x}_0 \exp(j\Phi_n) \mathbf{g}_n + N \\ &= \mathbf{x}_0 \left( \underbrace{\mathbf{h}_d + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_n \mathbf{g}_n \exp(j\Phi_n)}_K \right) + N \\ &= K \mathbf{x}_0 + N \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $K$ 表示的是接收端信号的复增益,  $N$ 表示的是高斯随机变量, 均值为0, 方差为噪声的功率。 $|K|$ 的值越大, 接收端的SNR越大。令接收端SNR最大的IRS的相位旋转集合的值为

$$\Phi_n = \text{angle}(\mathbf{h}_d) - \text{angle}(\mathbf{g}_n) - \text{angle}(\mathbf{h}_n) \quad (5)$$

对于IRS辅助的MISO系统而言, 可以根据式(5)直接得到最优的相移矩阵的值。

如图3所示为IRS辅助的MISO系统信号传输示意图。对于MISO场景而言, 不失一般性, 假设发送端的AP有 $M$ 根天线, 对应的信道向量为 $\mathbf{h}_d^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ , 此时, 这 $M$ 根天线可以生成的波束赋形向量的规模为 $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ , 假设发送端的AP到第 $n$ 个IRS反射单元的信道矩阵为 $\mathbf{g}_{r,n}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ , 第 $n$ 个IRS反射单元到用户的信道乘性系数为 $\mathbf{h}_r^{(n)}$ 。此时, 接收端用户收到的信号分为直射信号和反射信号的叠加, 表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_d^H \mathbf{w} + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_r^{(n)} \exp(j\Phi_n) \mathbf{g}_{r,n}^H \mathbf{w} + \mathbf{n} \quad (6)$$

接收端用户收到的来自第 $n$ 个IRS反射单元的信号为

$$\mathbf{y}_r^{(n)} = \mathbf{h}_r^{(n)} \exp(j\Phi_n) \mathbf{g}_{r,n}^H \mathbf{w} \quad (7)$$

故而接收端用户收到的所有的反射信号为

$$\mathbf{y}_r = \sum_{n=1}^N \mathbf{y}_r^{(n)} = \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_r^{(n)} \exp(j\Phi_n) \mathbf{g}_{r,n}^H \mathbf{w} \quad (8)$$

因此，接收端收到的总体的信号为

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_d + \mathbf{y}_r + \mathbf{n} = \mathbf{h}_d^H \mathbf{w} + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_r^{(n)} \exp(j\Phi_n) \mathbf{g}_{r,n}^H \mathbf{w} + \mathbf{n} \quad (9)$$

其中， $\mathbf{n}$ 的值为高斯噪声，均值为0，方差为噪声平均功率。

如图4所示，对于MIMO的场景而言，假设AP端总共有 $M$ 根天线，服务于 $K$ 个单天线用户，IRS的反射单元的数目为 $N$ 。为了便于分析，假设 $M \gg K$ 。此时，为了更好地服务于用户，AP端可以进行预编码，结合IRS的相位反射单元，联合优化接收端用户的失真性能。此时，假设AP到用户的直接链路的信道矩阵为 $\mathbf{H}_d \in \mathbb{C}^{K \times M}$ ，AP的预编码向量为 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ，AP到IRS的信道矩阵为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ，IRS到用户的信道矩阵为 $\mathbf{H}_r \in \mathbb{C}^{K \times N}$ ，IRS自身的相位旋转矩阵为 $\Phi \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 且 $\Phi$ 为对角矩阵。此时，用户接收到的信号向量可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}_d \mathbf{x} + \mathbf{H}_r \Phi \mathbf{G} \mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= \underbrace{(\mathbf{H}_d + \mathbf{H}_r \Phi \mathbf{G})}_{\bar{\mathbf{H}}} \mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (10)$$

IRS辅助的MIMO系统的信号传输模型还存在一种变体形式，即多用户MISO的形式。在该情况下，假设有 $K$ 个用户，AP对这 $K$ 个用户分配的波束赋形向量为 $\{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K\}$ ，这 $K$ 个用户需要接收到的信息为 $\{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ 。假设从AP到第 $k$ 个用户的直接信道向量为 $\mathbf{h}_{d,k}^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ，从IRS到用户的反射信号向量为 $\mathbf{h}_{r,k}^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ，AP到IRS的信

道矩阵为 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 。此时，第 $k$ 个用户接收到的信号为

$$\mathbf{y}_k = (\mathbf{h}_{r,k}^H \Theta \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \left( \sum_{j=1}^K \mathbf{w}_j \right) + \mathbf{n}_k \quad (11)$$

其中， $\mathbf{n}_k$ 表示用户收到的高斯噪声，满足均值为0，方差为噪声的平均功率。

### 3 波束赋形技术综述

截止到目前，国内外学术界和工业界的研究都表明，将IRS引入无线通信系统可以通过智能调控无线电磁环境改善系统性能受无线信道随机性和时变性的不利影响，而IRS波束赋形是实现智能调控无线电磁环境的主要手段。目前，国内外许多学者对此开展了一系列的研究工作，取得了大量的研究成果。这些学者分别从优化目标和优化使用的算法出发，探索波束赋形向量的设计。

本节遵循技术发展的内在逻辑，按照“经典理论奠基 → 多目标优化研究深入 → 新兴场景与前沿拓展”的清晰脉络进行组织。在此基础上，我们于每个研究阶段内部，进一步按照波束赋形向量的优化目标(功耗、能效、和速率、公平性)与系统架构(SISO, MISO, MIMO)两个维度进行精细化分类综述，波束赋形向量的优化目标大致可分为以功耗为优化目标、以能效为优化目标、以最大化和速率为优化目标、以用户通信公平性为优化目标，通过这些优化目标，设计合适的波束赋形向量和IRS相位旋转矩阵，使得传输信号满足相应的性能。其中，最小化功耗适用于能量严格受限的场景，其核心是在满足基本通信质量的前提下，尽可能延长设备续航。最大化能效则追求单位能量消耗所能传输

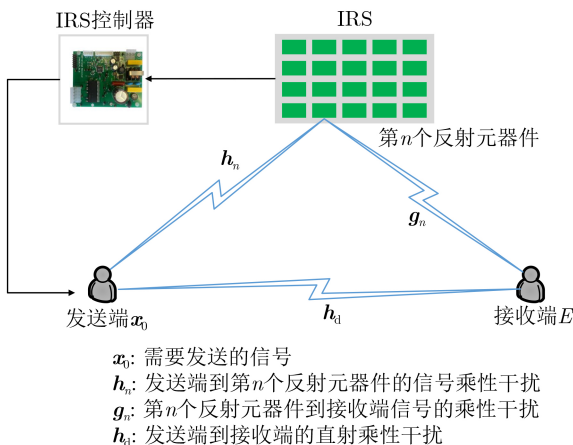


图2 IRS辅助的SISO信号传输图

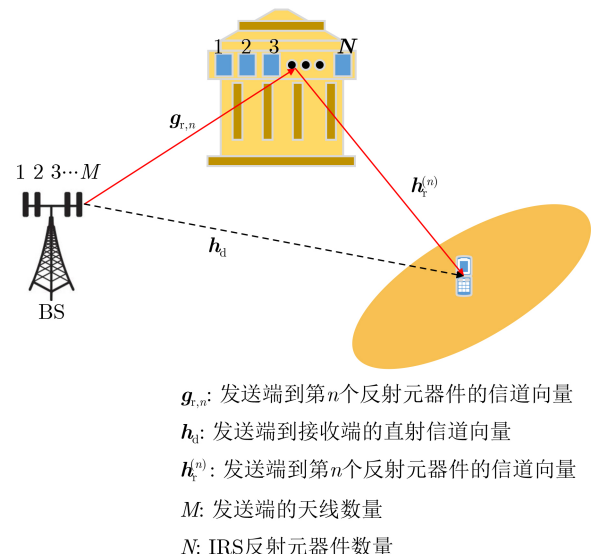


图3 IRS辅助的MISO信号传输图

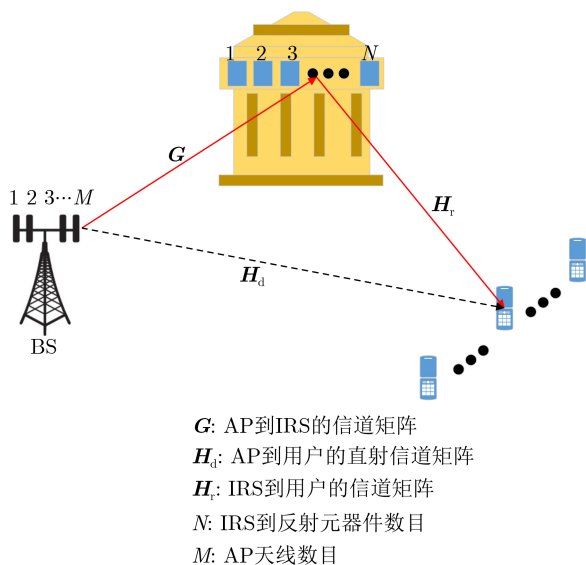


图4 IRS辅助的MIMO信号传输图

的比特数,适用于需兼顾性能与长期能耗的绿色通信网络。最大化和速率以提高系统总容量为核心目标,适用于信道条件良好、追求峰值吞吐量的场景。最大化公平通信速率则侧重于保障所有用户的体验,适用于多用户场景下避免“饿死”边缘用户、实现服务均衡。

### 3.1 经典工作与理论基础

IRS研究的初期,学术界的工作重心在于建立基本的系统模型、验证其性能潜力并探索核心的联合优化问题框架。这一时期的研究为整个领域奠定了坚实的理论和算法基础。

#### 3.1.1 基础模型与性能潜力验证

文献[5]是IRS领域的奠基性文献之一。该文系统地阐述了IRS的基本物理原理、硬件实现可能性及其在无线通信中的潜在应用场景,为后续大量的理论研究指明了方向,起到了重要的启蒙作用。几乎在同一时期,文献[6]进行了更具影响力的工作,他们首次明确提出了在IRS辅助的多用户MISO下行链路中“联合主动与被动波束赋形”这一核心科学问题。该研究建立了以最大化系统和速率为目标的优化框架,并创新性地采用半正定松弛和交替优化等经典算法来求解这一高度非凸的优化问题。他们所确立的“联合优化+交替迭代”研究范式,成为后续绝大多数研究的模板,极大地推动了该领域的发展。

#### 3.1.2 从理想模型到实际约束

在建立了理想的连续相移模型后,研究者迅速将目光投向更符合硬件实现的物理约束。文献[7]紧随其后的工作,深入探讨了离散相移约束下的波束赋形优化。他们深入分析了离散相位量化对系统性能的影响边界,并提出了相应的量化映射等优化

算法,标志着IRS研究从纯理论向实际工程应用迈出了关键一步。

#### 3.1.3 与传统技术的对比与定位

文献[8]进行了一项关键性研究,他们从性能增益和所需规模的角度,系统性地对比了无源IRS与传统解码转发中继。研究结论清晰地表明,要超越传统中继的性能,IRS通常需要部署较大的规模(即包含数百甚至数千个反射单元),但这同时也揭示了其无源、低功耗、低成本的潜在优势。这项工作为IRS在特定场景(如覆盖增强、能耗敏感区域)的技术选型提供了至关重要的理论依据。这一时期的研究确立了IRS核心优化问题的基本形式,验证了其巨大的性能潜力,并开始考虑实际硬件约束,为后续研究的百花齐放奠定了坚实的基石。

### 3.2 近期进展

近期的进展主要是在经典工作的基础上,建立IRS辅助的通信系统的信号传输模型。并根据这些信号传输模型,基于最小化功耗、最大化能效、最大化和速率、最大化公平通信速率等优化目标,研究相应的波束赋形向量和IRS相位旋转矩阵。本小节将基于最小化功耗、最大化能效、最大化和速率和最大化公平通信速率等优化目标,在每个目标下细分SISO, MISO, MIMO系统架构,对这一时期丰硕的研究进展进行系统梳理。

#### 3.2.1 最小化功耗的波束赋形技术

最小化系统功耗是绿色通信的核心目标之一,尤其在能量受限的物联网和移动终端场景中至关重要。该优化目标通常是在满足用户最低服务质量的前提下,联合优化基站的主动波束赋形向量和IRS的被动相移矩阵,使总发射功率最小。该类优化算法的适用场景主要集中在能量严格受限的通信系统中。例如:物联网系统,海量的物联网传感器节点通常由电池供电,且难以频繁更换,最小化其发射功率或系统总功耗至关重要;无线携能通信系统,系统需要为能量收集模块提供足够的能量,同时确保信息解码的速率,最小化功耗可以提升能量传输效率或延长终端工作时间;绿色通信系统,从网络运营者的角度,降低基站发射功率有助于减少运营成本和碳排放,符合可持续发展目标。

(1)IRS辅助的SISO系统中的功耗优化:在SISO系统中,由于天线配置简单,功耗优化主要集中在IRS相移的优化上,以提升链路质量从而降低发送端功率。文献[5]较早地研究了IRS辅助的SISO系统,通过优化IRS相移在满足接收端信噪比约束下实现了发送功率的最小化,为更复杂系统的研究奠定了基础。

(2)IRS辅助的MISO系统中的功耗优化: MISO系统通过多天线带来波束赋形增益,使功耗优化更具潜力。研究重点在于基站主动波束赋形与IRS被动波束赋形的联合优化。文献[6]对IRS辅助的多用户MISO系统建立信号传输模型,基于该信号传输模型,作者构建基站波束赋形和IRS相位旋转的波束赋形联合优化问题,求解符合条件的基站波束赋形向量和IRS相位旋转矩阵。其中,优化目标是基站端波束赋形的平均功率最小,对应的约束条件是各个用户的信干噪比的阈值。文献[7]将IRS处所要优化的连续相位改为离散相位,并基于分支定界算法、隐枚举法等,求解了IRS相位波束赋形矩阵。文献[8]和文献[9]比较了IRS辅助的通信系统和传统的译码转发的中继系统的通信性能,对IRS辅助的通信系统和传统的译码转发的中继系统的功耗都进行了优化,文献[8]和文献[9]的主要发现在于如果采用IRS代替传统的中继,则IRS需要较大的尺寸。文献[10]基于IRS辅助的MISO系统的广播通信,推导出了基站传输的最小功率的下界值。文献[11]对多用户MISO的下行系统进行功率最小化的处理,将用户分成不同的簇函数。NOMA的作用则是对每一个簇函数,都增强其信息传播能力。文献[11]使用了ADMM算法来优化基站的波束赋形向量和IRS的相位旋转矩阵。

(3)IRS辅助的MIMO系统中的功耗优化: 文献[12]针对IRS辅助的MIMO无线携能系统,构建功率最小化问题,通过最小均方误差和交替优化算法求解基站波束与IRS相移。文献[13]同样针对IRS辅助的MIMO无线携能通信系统,构建了功率最小化问题的模型,用以满足信息接收端的最小速率约束和能量接收端的最小能量收集约束。该优化问题的优化变量是基站端的主动波束赋形和IRS端的被动波束赋形。考虑到优化问题的非凸性质,文献[13]基于最小均方误差准则,将速率约束条件转化为一种更简单的形式,通过交替优化算法,求取最优的主动波束赋形向量和被动波束赋形矩阵。文献[14]通过联合优化基站端有源天线阵列的波束赋形和IRS的无源相移波束赋形,建立优化问题模型,目标是在确保每个用户的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)满足约束条件的同时,最小化基站天线的平均发射功率。该优化问题是一个非凸2次约束2次规划问题,并且优化变量之间高度耦合,为解决这一问题,文献[14]采用线性化交替方向乘子法算法,以解决发射功率最小化问题,该算法具有较低的复杂度。文献[15]提出了一种IRS的方法,用以阻断非法用户接收信号。

为了权衡非法用户的信干噪比和系统的能效,建立了优化问题模型,其中,优化目标是系统的能效最大,对应的约束条件是非法用户的信干噪比低于约束值。文献[16]探讨了一种基于IRS辅助的安全双工NOMA系统,在信道估计误差和收发器硬件损伤同时存在的情况下,建立了信号传输模型,并基于该传输模型,建立优化问题模型。其中,优化目标是发送功率最小,对应的约束条件是用户的信干噪比高于约束值。文献[17]对IRS辅助的NOMA下行系统进行功率最小化处理。基于波束赋形和相位的联合优化问题是非常难以处理的双2次优化问题。文献[17]首次提出了半正定松弛的方法,并基于凸差函数的思路进行处理。文献[18]评估了不同的波束赋形方案的功耗性能。当假定完美的信道信息的时候,使用交替优化的算法优化AP的波束赋形向量。文献[19]考虑了IRS的相位变量是离散情况下的功耗优化算法。当IRS的相位变量是离散的时候,可行的优化算法是首先把IRS的相位变量当成连续的相位变量,然后,采用量化映射的方法得到最优的离散的相位旋转值。文献[20]基于IRS辅助的无线携能通信的场景,将有源IRS和无源IRS器件进行混合,构建了主被动切换的IRS辅助的无线携能通信方案。该方案以系统整体的功耗为优化目标,研究合适的波束赋形向量、IRS反射向量和功率放大系数,保证系统有足够低的功耗。

(4)小结: IRS辅助的无线通信系统最小化功耗的波束赋形的一些典型优化算法总结如表1。

### 3.2.2 最大化能效的波束赋形技术

能效优化旨在最大化单位能量消耗所能传输的比特数,是绿色6G通信的核心指标之一。它与单纯的最小化功耗不同,更强调在性能与能耗之间取得最佳平衡,适用于需长期运行的密集网络。该问题的优化变量通常包括基站发射功率、波束赋形向量以及IRS相移矩阵。该类优化算法的适用场景是那些需要在性能与能耗之间取得最佳平衡的系统,其核心指标是“比特/焦耳”。典型场景包括:密集城区蜂窝网络,基站密度高,用户密集,单纯追求速率可能导致基站间干扰加剧和能耗陡增,最大化能效可以在保证一定服务质量的同时,实现网络的节能运行;用户中心网络,在这种以用户体验为导向的网络中,能效优化可以动态调整资源,确保用户在获得满意服务的同时,不过度消耗网络能量;集成传感与通信系统,系统资源需要在通信和感知功能间共享,最大化能效可以优化资源分配,实现通信感知性能与能耗的联合优化。

(1)IRS辅助的SISO系统中的能效优化: 文

表1 最小化功耗波束赋形典型优化算法总结

文献	核心目标	方法/算法	适用场景	优缺点
[6]	最小化发射功率, 满足用户SINR约束	交替优化、半正定松弛	多用户MISO下行	优点: 理论完整; 缺点: 假设连续相移, 不切实际
[7]	离散相移下的功耗优化	分支定界、隐枚举法	硬件受限系统	优点: 更实用; 缺点: 性能损失, 复杂度高
[11]	NOMA分簇下的功率最小化	ADMM算法	密集用户场景	优点: 提升频谱效率; 缺点: 簇间干扰难控制
[12,13]	SWIPT系统中功率最小化	最小均方误差+交替优化	能量收集通信	优点: 能同时满足速率与能量约束; 缺点: 非凸问题难收敛
[16]	存在硬件损伤下的安全功耗优化	联合波束与相位设计	全双工NOMA安全系统	优点: 考虑实际损伤; 缺点: 模型复杂, 难以实现

献[21]利用IRS提高系统的能效, 主要采用了2种方法。第一是将反射元器件进行分组, 每个组选择服务于特定的用户。第二是采用基于位置的相位优化算法。文献[22]研究了一种IRS辅助的用户中心网络场景。在该场景中, IRS用于在没有额外能耗时提高用户发送的信号质量。为了实现最优能效, 联合优化IRS的反射波束赋形和用户上行功率控制。该优化问题的优化目标是能效最大化, 优化变量是IRS的波束赋形矩阵和上行链路控制参数, 对应的约束条件是最小信干噪比。该问题是非凸优化问题, 为有效求解, 将该问题分解为两个子问题并交替优化: 首先通过分式规划设计IRS的反射波束赋形矩阵, 再基于最大值最小化算法构建代理函数实现用户上行功率控制。文献[23]研究了一种新型场景下IRS辅助的多用户多目标通感一体系统能效优化问题, 其中基站与目标间的直接链路被阻断。通过分析能效表达式与信号关联性, 将能效最大化建模为一个具有多重约束条件的优化问题, 包括感知互信息约束、基站发射功率约束以及无源IRS反射系数限制。

(2) IRS辅助的MISO系统中的能效优化: MISO系统的能效优化空间更大, 焦点在于多天线的增益与IRS反射增益的协同。文献[24]将无线信息与能量收集技术引入基于同步收发IRS的速率分割多址接入系统, 以提升系统能效。在基站功率约束条件下, 通过联合优化IRS的反射系数、波束赋形向量、功率分配因子, 构建满足公共信息速率约束条件下的最大的能效系统。

(3) IRS辅助的MIMO系统中的能效优化: 文献[25]对可同时透射和反射的IRS辅助的通信系统进行仿真。该通信系统在可同时透射和反射的IRS系统的两侧部署了多用户和窃听者。该文以最大化系统的能量效率为优化目标, 以发射功率、IRS的波束的模长为1、IRS的能量守恒和单位时间的延迟为约束条件, 得到相应的波束赋形和IRS相位旋转向量。文献[26]对支持能量/功率高效同步无线信

息与能量传输IRS辅助MIMO通信网络建立信号传输模型。在这个信号传输模型中, 基站借助IRS同时与多个信息接收端和能量接收端进行通信。在建立完成信号传输模型以后, 作者建立优化问题模型, 以功率最小化为优化目标, 以最低信息接收速率需求和最小能量接收需求为约束条件, 联合优化基站的有源波束赋形矩阵和IRS的无源波束赋形矩阵。由于这个优化问题模型是非凸的, 作者采用基于均方误差的方法将最小速率约束转化为更简洁的形式。随后, 通过交替优化方法将主非凸问题拆解为2个更简单的子问题, 分别求解最优有源波束赋形矩阵和无源波束赋形矩阵。

(4) 小结: IRS辅助的无线通信系统最大化能效波束赋形典型优化算法如表2所示。

### 3.2.3 最大化和速率波束赋形技术

最大化和速率直接对应着香农容量理论, 其目标是最大化系统总频谱效率, 是评估通信系统峰值性能的关键指标。该优化通常通过联合设计发送端预编码/波束赋形和IRS相移矩阵, 使所有用户的速率之和最大。根据香农定理, 系统的和速率与系统的SINR成正比。因此, 最大化和速率有时也可等价于最大化SINR。最大化和速率优化波束赋形技术的适用场景是那些核心目标为最大化系统总吞吐量的场景, 通常假设有足够的功率预算。主要适用于: 热点区域覆盖, 如体育馆、音乐厅、大型商场等用户密集区域, 系统的主要任务是满足高峰期的巨大数据流量需求; 无线回传, 当使用无线信号进行高速回传时, 最大化和速率可以提升回传链路的容量, 支撑前端接入网络的高速率需求。信道条件优良的场景, 当用户处于基站覆盖中心或信道质量较好时, 系统资源可以倾向于最大化速率。

(1) IRS辅助的SISO系统中的和速率优化: 在单用户SISO场景中, 和速率优化退化为点对点链路容量最大化。其核心是优化IRS相移, 使接收端信噪比最大化。文献[27]的研究表明, 通过优化IRS部署位置和相位配置, 可显著提升SISO链路的

表2 最大化能效波束赋形典型优化算法总结

文献	核心目标	方法/算法	适用场景	优缺点
[21]	反射元器件分组服务的能效优化	基于位置的相位优化	多用户SISO系统	优点: 复杂度低, 易于实现; 缺点: 性能受用户分布影响大
[22]	用户中心网络的能效最大化	分式规划+最大值最小化算法	上行用户中心网络	优点: 兼顾用户体验与能效; 缺点: 需要精确的信道信息
[23]	通感一体系统的能效优化	多约束联合优化	通信感知一体化	优点: 实现通感功能平衡; 缺点: 优化变量多, 收敛性差
[24]	STAR-IRS赋能的能效优化	联合优化反射系数与功率分配	速率分割多址系统	优点: 全空间覆盖, 频谱效率高; 缺点: 能量守恒约束增加复杂度
[26]	MIMO-SWIPT系统的能效优化	基于均方误差的交替优化	无线携能通信	优点: 同时服务信息与能量接收端; 缺点: 非凸问题求解困难

可达速率。该文献通过改变IRS在基站和用户之间的投影位置实现速率的提升。作者的研究结果表明, 与随机相位配置相比, 最优相位偏移配置在AP端和UE端分别实现了约 $3.353 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 和约 $3.374 \text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 的性能增益。

(2)IRS辅助的MISO系统中的和速率优化: 文献[28]基于IRS辅助的无线供能通信, 提出了一种混合多址接入策略。IRS通过时分多址技术分配相位偏移, 每个相位偏移又为多物联网设备提供非正交多址接入。在下行通信阶段, 每个物联网设备利用非线性的方式收集能量。文献[29]基于上行无线信息传输阶段, 使用定点法和流形优化来求解IRS处的被动波束赋形。结果证明了所使用的算法相比于半正定松弛算法具有更好的性能以及更低的复杂度。文献[30]基于IRS辅助的多用户MISO反向散射通信系统, 基于有界信道状态信息模型, 提出了一种多变量耦合可达速率最大化问题。该问题综合考虑了反向散射设备电路启动、基站发射功率与IRS相位偏移约束。文献[31]基于共生无线电的场景, 通过优化IRS的波束赋形矩阵, 研究可达保密速率最大化问题。为此, 采用路径跟踪算法对该问题进行迭代求解。文献[32]基于IRS增强的MISO辅助的正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)下行系统, 提出了波束赋形和IRS相位旋转因子联合的优化算法。其中, 优化目标是下行的最大可达和速率, 对应的约束条件是基站的功率分配约束。解决该优化问题的可行方法是进行交替优化。文献[33]基于IRS辅助的多用户MISO系统, 提出了和速率最大化的算法。该算法的场景是AP的功率预算受限的场景。为了保证和速率最大, 每一个用户都给了一个最小数据速率的要求。在该文献中, 和速率最大化的要求首先使用ZF传输方案进行简化, 然后, 使用迭代算法优化传输功率和相位旋转矩阵。这一方法是将迭代优化算法与最大最小化算法相结合。文献[34]在MISO认知无线电系统中, 使用多个IRS, 以最大化辅助

接收设备的速率为优化目标, 相应的约束条件是主接收设备的干扰。文献[35]使用多个IRS来辅助毫米波MISO的通信, 通过对基站端的波束赋形和多个IRS的相位旋转因子进行联合优化, IRS可以为毫米波通信提供更多的反射路径, 因此, 得以最大化接收信号的功率, 从而提高毫米波通信网络的覆盖能力。文献[36]考虑到了IRS相移的不理想的情况, 提出了实际场景中的IRS相移动模型。该相移模型分析了IRS的相移控制误差和信号幅度的非线性关系, 在引入了该模型的IRS辅助的MISO下行系统中, 作者提出了联合基站端的波束赋形和IRS相移矩阵的优化算法用以最大化IRS辅助的MISO系统下行和速率。该优化模型可以用交替优化算法求解。文献[37]充分分析了在离散的相位控制场景下, 相比于连续的IRS相位旋转, 信道容量的下降幅度与量化级数的关系。基于统计信道信息, 作者基于IRS辅助的MISO场景, 分析推导了遍历信道容量的紧界, 并通过优化IRS的相位旋转矩阵, 最大化遍历信道容量的紧界。

(3)IRS辅助的MIMO系统中的和速率优化: 文献[38]研究有限字符隐蔽通信, 通过互信息下界与相对熵散度构建速率上界优化模型。文献[39]提出了一种基于IRS辅助的无人机空地协同方案。该方案将IRS部署在邻近建筑物表面, 将地面发射端的下倾波束向上反射至无人机, 实现无人机接收到的信号强度的提升。该方案根据基站到IRS, IRS到无人机以及基站到无人机的信道特性和相应的信道差错特点, 建立无人机处的信号接收模型, 并基于该模型, 构建分布鲁棒优化问题, 并提出基于条件风险价值的算法, 联合优化发射端主动波束赋形、IRS相位配置以及无人机飞行轨迹, 实现通信的速率提升。文献[40]在太赫兹通信的场景下, 对IRS辅助的安全通信系统, 建立基站和IRS联合波束赋形方案, 提升系统的安全通信速率。该方案中, 基于系统存在多个窃听者的情况下, 由基站向合法用户发送保密信息。合法用户采用基于功率分配的能量收

集模型, 以实现信息与能量的同步传输。为最大化安全通信速率, 作者联合优化了基站波束赋形、IRS反射矩阵以及功率分配比。文献[41]提出了一种基于射频和IRS辅助的未经授权的无人机检测技术。该技术基于莱斯衰落的空对地信道特性、IRS到未经授权的无人机和IRS到检测设备之间的信道特性, 构建信号传输模型, 并基于该信号传输模型, 开发了一个分析框架, 该框架给出了满足检测准确率约束条件下, 通信速率最快的基站波束赋形和IRS相位旋转矩阵。文献[42]提出了变频IRS技术, 与传统的IRS技术不同的是, 变频IRS技术可以持续调制入射电磁波的相位从而引发频率偏移。通过为每个变频IRS单元分配特定频率, 使接收端可通过检测频率偏移量区分不同传播路径的信道。这种解耦特性使得信道估计成为可能, 并增强了频域分集增益。作者针对单载波系统, 推导了完美信道状态信息与非完美信道状态信息两种场景下可达数据率的闭眼下界及其对应的功率缩放规律。对于多载波系统, 提出了2种以最大化最低用户信干噪比为目的的调度算法。这些方法都极大提升了各个用户的接收信息传输速率。文献[43]基于深度学习和有源IRS技术, 将基站发射波束赋形矩阵与IRS相位偏移矩阵的联合设计整合于和速率最大化的统一框架中。提出了一种深度学习技术, 通过与环境进行试错交互获取联合设计方案, 并能确定合适的功率分配策略以平衡基站与有源IRS之间的功耗。文献[44]研究了IRS辅助的多用户认知无线电无线信息与能量同传MIMO系统中主动波束赋形与被动波束赋形的联合设计与优化。作者针对认知能量收集节点可能作为窃听者的场景展开研究。在发射功率控制、能量收集、相位偏移以及最大可容忍干扰功率等约束条件下, 以最大化认知信息解码节点的保密速率为优化目标。文献[45]通过联合优化IRS的反射系数以及基站发送信号向量的协方差矩阵, 分析推导了在广播通信场景的IRS辅助的MIMO-OFDM系统的信道容量极限的性质。在该场景中, 信道环境被视为频率选择性衰落的信道。因此, 信号传输的协方差矩阵可以基于各个子载波独立进行优化。在文献[46]中, 由于毫米波的信道矩阵的秩为1, 因此, 基于这一性质, 在毫米波通信的场景下, 作者分析推导了发送端的波束赋形向量和IRS的相移参数的解析解。文献[47]研究了IRS辅助的毫米波MIMO-OFDM系统点对点通信的混合预编码矩阵和IRS相移矩阵。在该文献中, 数字预编码矩阵、模拟预编码矩阵和IRS相移矩阵是独立进行优化的。文献[48]分析推导了IRS辅助的

MIMO系统的各态历经容量。为了最大化信道容量的上界, IRS的相移矩阵通过半正定松弛和高斯随机化算法进行优化。文献[49]对IRS辅助的MIMO系统的信号传输系统, 建立混合整数优化模型, 进行最大和速率优化。基于交替优化算法的框架, 作者引入ADMM算法找寻各个IRS单元的相移参数。相应的基站端的波束赋形技术是通过传统的奇异值分解和注水算法得到的。文献[50]基于IRS辅助的MIMO系统的双向全双工场景, 通过联合优化两边终端的预编码向量和对应的IRS相移矩阵, 实现通信传输的和速率最大。文献[51]构建了一种最大化用户的可达速率的优化算法, 该算法的目的是优化IRS的相位旋转策略, 从而最大化用户可达速率的上界。这种优化算法采用了一种低复杂度的连续精化算法。当选择合适的初始点时, 该算法可以得到高质量的次优解。文献[52]提出了一种梯度上升的算法, 获取最优的IRS相移系数, 实现IRS辅助的OFDM系统的和速率最大化。该算法有足够低的计算复杂度、足够快的收敛速率。相比于不适用IRS, 信息速率有明显提升。文献[53]将完美信道估计的和速率最大化的问题延伸到非完美信道估计的场景。在完美信道估计的场景中, 主动和被动波束赋形向量的值可以通过分式规划得到。这一思想可以进一步延伸到非完美信道估计的场景, 基于连续凸近似的方法得到最优的主动和被动波束赋形向量。文献[54]基于经典的多用户MIMO系统, 提出了一种基于足够多反射单元的IRS, 构造无干扰波束的可行性。仿真结果表明, 一套带权重的最优的波束集合可以生成无干扰的波束串, 这将适用于多流MIMO的通信。文献[55]考虑了更为复杂的多小区多组播下行传输系统。考虑到不同的用户需要收到的信息是独立的且各不相同的, 因此, 组间干扰和小区间干扰总是存在。为了最大化所有用户的和速率, 首先分析推导了目标函数的下界, 这是一个凹函数。然后, 使用交替优化算法, 得到了基站的预编码矩阵和IRS的被动波束赋形。文献[56]基于多小区系统, 将IRS部署在小区边缘, 用以辅助MIMO系统中的边缘用户, 提升用户的和速率。

(4)小结: IRS辅助的无线通信系统最大化和速率波束赋形技术典型算法总结如表3所示。

### 3.2.4 最大化公平通信速率波束赋形

用户通信的公平性是一个同样需要考虑的内容。通常, 衡量用户通信的公平性采用的指标是公平通信速率, 即用户最大的速率和最小的速率之差。当最大速率和最小速率之差足够低的时候, 可以认为各个用户的通信速率大致相等, 即各个用户之间的

通信相对公平。该类优化算法的适用场景是多用户通信系统中需要保障用户体验公平性的场景。其目标是提升系统性能的“短板”，避免部分用户服务质量过差。典型应用包括：小区边缘用户服务，位于小区边缘的用户信号弱、干扰强，公平性优化可以强制系统资源向这些用户倾斜，提升其速率，实现整个小区覆盖范围的均衡；多租户网络或切片网络，不同租户或网络切片支付了相似的费用，需要获得相对公平的服务质量保障，避免某一方独占资源；应急通信与公共安全网络，在此类网络中，确保每个用户(或救援单元)都能保持基本可用的通信连接远比最大化总容量更为重要。

文献[57]基于通感一体的场景，研究了IRS辅助的增强通信公平性的波束赋形算法。该波束赋形算法的公平性体现在目标检测能力的公平性和用户安全通信能力的公平性方面。作者的优化目标是最大化目标方向上的最小波束方向图增益，其约束条件包括安全传输要求、功率预算限制、IRS反射系数约束以及IRS引入的噪声限制。文献[58]基于融合了透视和反射的IRS系统，提出了IRS相位旋转矩阵和基站波束赋形矩阵的联合优化算法。其优化目标是最大化用户最大的接收信号均方误差，保证各个用户通信的公平性，优化变量包括预编码矩阵、反射和透射矩阵等。文献[59]在IRS辅助的NOMA系统中，最大化所有用户的最小SINR。该优化算法是通过联合优化基站的波束赋形和IRS的相位旋转技术联合得到的。文献[60]基于一系列的分布式IRS单元，最大化最小的用户速率。在分布式IRS单元中，每一个IRS都有一个独立的信号处理单元，这些IRS处理单元连接着中央处理系统，统一协调所有的IRS单元。在该文献中，作者通过构建独特的IRS分布方案，实现最小用户速率的最

大化。文献[61]在多址接入系统中联合优化IRS波束与资源分配，通过动态反射系数提升用户最小速率。IRS辅助的无线通信系统最大化公平通信速率典型优化算法列举如表4所示。

### 3.3 未来方向

当前，已经有文献对未来的方向展开了研究。未来的研究方向主要是考虑将IRS与新材料、新硬件、新范式等紧密结合，迈向更复杂的研究场景，不断推动IRS技术的能力边界。主要归纳如下。

(1)有源IRS：为了克服传统无源IRS存在的“乘性衰落”效应(即级联信道损耗大)，有源IRS被提出。其在反射单元中集成了有源放大器(如低噪声放大器)，能够对反射信号进行放大。文献[62]系统地对比了有源与无源IRS的性能，明确指出有源IRS在补偿路径损耗、扩大中远距离覆盖方面的巨大优势，同时也讨论了其引入的额外功耗和自干扰等问题。文献[63]则探索了有源IRS系统的和速率优化问题，展现了有源IRS对系统和速率提升的潜力。

(2)同时透射反射表面：同时透射反射表面能够对入射信号进行同时且可控的透射与反射，实现了360°全空间电磁调控，打破了传统IRS只能反射的局限。文献[64]对同时透射反射表面的基础原理、近期进展和未来方向进行了全面综述。文献[65]和文献[66]则具体展示了同时透射反射表面在实现全空间覆盖、提升系统能效和用户公平性方面的巨大潜力，使其成为当前的研究热点之一。

(3)是通感一体化：IRS为通信与感知的频谱共享和功能互促提供了革命性的手段。文献[67]研究了在主动IRS辅助的安全ISAC系统中，如何通过联合设计发射和反射波束赋形来平衡整体性能与通信安全需求，体现了IRS在复杂功能融合系统中的协调作用。

表3 最大化和速率束赋形典型优化算法总结

文献	核心目标	方法/算法	适用场景	优缺点
[28]	混合多址接入下的和速率最大化	时分多址+非正交多址	物联网上行	优点：支持多设备；缺点：相位分配策略复杂
[33]	功率受限下的和速率最大化	ZF传输+最大最小化算法	多用户MISO	优点：低复杂度；缺点：性能受限于迫零预编码
[36]	非理想相移模型下的和速率优化	交替优化	实际IRS系统	优点：模型更真实；缺点：对误差敏感
[42]	变频IRS下的速率最大化	频率偏移调度算法	频域分集系统	优点：提升频域分集；缺点：硬件实现难度大
[43]	有源IRS下的和速率优化	深度学习	高功率、高复杂度场景	优点：自适应强；缺点：训练开销大

表4 最大化公平通信速率波束赋形典型优化算法总结

文献	核心目标	方法/算法	适用场景	优缺点
[57]	最大化最小波束方向图增益	联合发射与反射波束设计	通感一体化系统	优点：兼顾感知与通信；缺点：目标冲突难平衡
[58]	最小化最大均方误差	联合预编码与STAR-IRS设计	全空间覆盖系统	优点：提升用户公平性；缺点：优化变量多，收敛慢
[59]	最大化最小用户SINR	联合波束与相位优化	NOMA系统	优点：适用于功率域复用；缺点：对信道差异敏感
[60]	分布式IRS的最小用户速率最大化	中央协调的分布方案	广域覆盖网络	优点：时隙灵活；缺点：调度策略复杂

(4)太赫兹与安全通信: 在太赫兹等更高频段, 信号易受阻且路径损耗大, IRS的信号重构能力越来越关键。文献[68]探索了IRS在太赫兹安全通信中提升安全速率和实现能量收集的联合优化方案, 为下一代高速、高安全性的通信技术提供了新思路。

(5)IRS硬件结构: 近年来, 智能超表面硬件技术发展迅速, 为其在6G系统中的实际部署奠定了坚实基础。早期的IRS设计多基于PIN二极管或变容二极管, 通过控制偏置电压实现相位的离散或连续调节, 但存在响应速度、功耗和集成度方面的挑战。为突破这些限制, 新型硬件方案不断涌现。可编程超表面通过集成FPGA或专用控制芯片, 实现了对大量反射单元的独立、实时控制, 支持复杂的波束赋形算法, 为动态智能电磁环境提供了硬件平台[69]。特别是在高频段(如毫米波、太赫兹), 基于微机电系统[70]和液晶材料[71]的IRS设计取得了显著进展, 它们能够提供低功耗、快速响应和连续的相位调制, 以满足高频通信对波束精确控制的需求。另外, 有源智能反射面的研究成为近年来的热点。与无源IRS仅能调整相位不同, 有源IRS在反射单元中集成了低噪声放大器等有源电路, 能够有效补偿信号在传播过程中的路径损耗, 从而显著扩大覆盖范围, 特别适用于中远距离通信场景[72]。同时, 同时透射与反射智能超表面的硬件实现也取得了突破, 它能够将在入射信号同时可控地反射和透射, 实现360°的全空间电磁波调控, 极大提升了空间自由度与用户接入能力[73]。在材料创新方面, 功能材料驱动的IRS设计展现出巨大潜力。例如, 利用相变材料在外界刺激(热、电)下发生的晶态-非晶态可逆转变, 可以实现对电磁波幅度和相位的非易失性、多电平调控[74]。而石墨烯等二维材料因其优异的电调谐特性, 也被用于开发超薄、可重构的超表面器件[75]。展望未来, IRS硬件设计正朝着多功能化(如通感一体化)、一体化(与天线/射频前端集成)、智能化(内置AI处理单元)和可扩展化(超大规模阵列)的方向发展, 以期在未来的6G网络中实现真正自适应、自优化的智能无线环境。

## 4 研究不足与未来展望

### 4.1 现有研究的主要不足与挑战

当前研究的局限性主要体现在以下几个方面, 这也是实现IRS技术实际部署所必须面对的挑战。

(1)对信道信息理想化的依赖: 绝大多数联合优化算法都建立在完美信道状态信息的假设上。然而, IRS作为一种无源设备, 其引入的基站-IRS-用户级信道估计非常困难, 存在导频开销大、反馈

延迟高等问题。在快时变信道或大规模IRS系统中, 非完美信道信息将导致算法性能严重下降。

(2)算法复杂性与实时性的矛盾: 联合优化主动波束赋形和被动相移矩阵通常导致非凸优化问题, 现有算法(如交替优化、半正定松弛等)计算复杂度高, 难以满足6G低时延通信对实时处理的苛刻要求。缺乏低复杂度、可快速收敛的实用化算法。

(3)硬件非理想特性的忽略: 现有信号模型往往假设理想的IRS硬件, 而忽略了实际硬件存在的损伤, 如离散相移带来的量化误差、反射单元间的互耦效应、有源IRS的放大器非线性噪声以及STAR-IRS的能量守恒约束等。这些非理想特性会导致理论设计与实际性能之间存在巨大差距。

(4)研究场景的局限性: 目前研究多集中于简化的下行链路或点对点通信, 对于更复杂的场景, 如上行链路、多小区异构网络中的干扰协调、高移动性场景下的波束跟踪与管理等, 研究成果尚不充分, 缺乏系统级的性能分析。

(5)跨层设计与系统级优化的缺失: 现有工作绝大多数聚焦于物理层链路级优化, 未能将IRS的物理层增益与上层(如媒体接入控制层、网络层)技术(如用户调度、资源分配、网络切片)进行协同设计, 未能从全局视角挖掘IRS提升网络整体性能的潜力。

### 4.2 未来研究方向与趋势

基于上述挑战, 未来的研究重点将从理想模型转向实际应用, 具体趋势包括但不限于以下方面。

(1)低开销鲁棒性信道获取与反馈技术: 探索基于压缩感知、深度学习的稀疏信道估计方法, 研究基于统计信道信息或位置信息的波束赋形方案, 以降低对瞬时完美信道信息的依赖, 增强系统在非理想信道条件下的鲁棒性。

(2)人工智能赋能的低复杂度算法设计: 利用深度学习、强化学习等AI方法, 将复杂的在线优化转化为离线训练与在线轻量级推理, 设计能够自适应环境变化、满足实时性要求的智能波束赋形与资源管理算法。

(3)面向实际硬件的建模与联合优化: 建立更精确的、包含硬件损伤的IRS信道与信号传输模型, 并在此基础上设计对硬件非理想特性不敏感的鲁棒联合优化算法, 推动理论研究向实际应用转化。

(4)拓展复杂前沿应用场景: 深入研究IRS在集成感知与通信、空天地一体化网络、无人机中继、通感一体化等6G前沿场景中的关键作用, 解决其中的动态性、干扰管理和资源协同等新问题。

(5)跨层协同与网络化智能: 将IRS作为网络的新型可控资源, 研究其与移动边缘计算、网络功能虚拟化、数字孪生等技术的协同, 实现从“链路优化”到“全网智能”的跨越, 最终实现可编程的智能无线环境。

## 5 结论

IRS辅助的无线通信技术在6G时代有着光明的前景。本文对IRS辅助的SISO, MISO和MIMO系统建立了信号传输模型, 在此基础上, 本文对IRS辅助的MIMO系统的波束赋形技术和相移技术进行了综述分析, 并进行了相应的研究展望。

### 参考文献

- [1] KIRIK M, ALKANA'NEH A, AFEEF L, *et al.* Efficient interference management design for NTN/TN co-existence in HAP-based 6G networks[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 5434–5449. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3580452](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3580452).
- [2] LIU Guangyi, ZHU Yanhong, KANG Mancong, *et al.* Native design for 6G digital twin network: Use cases, architecture, functions, and key technologies[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(15): 29135–29151. doi: [10.1109/JIOT.2025.3553500](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3553500).
- [3] LI Xinyao, FEI Teng, CHEN Ruogu, *et al.* Intelligent reflective surface assisted beamforming optimization[C]. 10th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing, Xi'an, China, 2025: 182–185. doi: [10.1109/ICSP65755.2025.11087112](https://doi.org/10.1109/ICSP65755.2025.11087112).
- [4] WU Qingqing, ZHENG Beixiong, YOU Changsheng, *et al.* Intelligent surfaces empowered wireless network: Recent advances and the road to 6G[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2024, 112(7): 724–763. doi: [10.1109/JPROC.2024.3397910](https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3397910).
- [5] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, *et al.* Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753–116773. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2935192](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2935192).
- [6] WU Qingqing and 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](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2936025).
- [7] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(3): 1838–1851. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2958916](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2958916).
- [8] BJÖRNSON E, ÖZDOĞAN Ö, and LARSSON E G. Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: How large surfaces are needed to beat relaying?[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(2): 244–248. doi: [10.1109/LWC.2019.2950624](https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2950624).
- [9] YU Xianghao, XU Dongfang, and SCHÖBER R. Miso wireless communication systems via intelligent reflecting surfaces: (Invited paper)[C]. 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Changchun, China, 2019: 735–740. doi: [10.1109/ICCCChina.2019.8855810](https://doi.org/10.1109/ICCCChina.2019.8855810).
- [10] HAN Huimei, ZHAO Jun, NIYATO D, *et al.* Intelligent reflecting surface aided network: Power control for physical-layer broadcasting[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020: 1–7. doi: [10.1109/ICC40277.2020.9148827](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148827).
- [11] LI Yiqing, JIANG Miao, ZHANG Qi, *et al.* Joint beamforming design in multi-cluster MISO NOMA reconfigurable intelligent surface-aided downlink communication networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 664–674. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3032695](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3032695).
- [12] VISHWAKARMA P, SUR S N, DHAR S, *et al.* IRS-assisted SWIPT: Power optimization strategies for green communications[C]. 17th International Conference on Communication Systems and Networks, Bengaluru, India, 2025: 356–364. doi: [10.1109/COMSNETS63942.2025.10885691](https://doi.org/10.1109/COMSNETS63942.2025.10885691).
- [13] YASWANTH J, SINGH S K, SINGH K, *et al.* Energy-efficient beamforming design for RIS-aided MIMO downlink communication with SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, 7(3): 1164–1180. doi: [10.1109/TGCN.2023.3273031](https://doi.org/10.1109/TGCN.2023.3273031).
- [14] JIANG Jinghan, WANG Yajun, LIAN Zhuxian, *et al.* Joint beamforming and phase shift design in intelligent reflecting surface-assisted wireless communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(19): 41170–41180. doi: [10.1109/JIOT.2025.3592309](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3592309).
- [15] HAO Qin, JIA Zhu, ZOU Yulong, *et al.* Energy efficiency optimization for active reconfigurable intelligent surface assisted multi-antenna jamming systems[J]. *China Communications*, 2025, 22(6): 44–56. doi: [10.23919/JCC.ja.2023-0672](https://doi.org/10.23919/JCC.ja.2023-0672).
- [16] MEAD J A, SINGH K, ALLU R, *et al.* Transmit power minimization for secure RIS-aided full-duplex NOMA communications with HWI[C]. 2024 IEEE Globecom Workshops, Cape Town, South Africa, 2024: 1–6. doi: [10.1109/GCWkshp64532.2024.11100374](https://doi.org/10.1109/GCWkshp64532.2024.11100374).
- [17] FU Min, ZHOU Yong, and SHI Yuanming. Intelligent reflecting surface for downlink non-orthogonal multiple access networks[C]. 2019 IEEE GLOBECOM Workshops, Waikoloa, USA, 2019: 1–6. doi: [10.1109/GCWkshps45667](https://doi.org/10.1109/GCWkshps45667).

- 2019.9024675.
- [18] ZHENG Beixiong, WU Qingqing, and ZHANG Rui. Intelligent reflecting surface-assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA?[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(4): 753–757. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2969870](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2969870).
- [19] WU Qingqing and ZHANG Rui. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts[C]. 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Brighton, UK, 2019: 7830–7833. doi: [10.1109/ICASSP.2019.8683145](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2019.8683145).
- [20] ATA Y, ZEDINI E, VEGNI A M, *et al.* Reflect-and-amplify: A novel SWIPT technique through hybrid active/passive RIS[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(12): 22073–22089. doi: [10.1109/JIOT.2025.3549976](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3549976).
- [21] KUMAR M P, SUMMAQ A, and CHINNADURAI S. Phase shift optimization for energy-efficient uplink communication in IRS-aided system[C]. 17th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), Bengaluru, India, 2025: 1172–1177. doi: [10.1109/COMSNETS.63942.2025.10885611](https://doi.org/10.1109/COMSNETS.63942.2025.10885611).
- [22] ZHANG Chenwu, LU Hancheng, and CHEN Changwen. Reconfigurable intelligent surfaces-enhanced uplink user-centric networks on energy efficiency optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(12): 9013–9028. doi: [10.1109/TWC.2023.3267819](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3267819).
- [23] LIU Wenhui, JIAO Wanguo, ZHANG Xian, *et al.* Joint beamforming and reflection design for maximizing energy efficiency of RIS-assisted ISAC systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025. doi: [10.1109/TWC.2025.3596087](https://doi.org/10.1109/TWC.2025.3596087).
- [24] GAO Chang, HUI Xiaonan, HUANG Chongwen, *et al.* Energy efficiency optimization of STAR-RIS empowered RSMA system with SWIPT[C]. IEEE 24th International Conference on Communication Technology, Chengdu, China, 2024: 1691–1696. doi: [10.1109/ICCT62411.2024.10946368](https://doi.org/10.1109/ICCT62411.2024.10946368).
- [25] NASIR A A. Max-min secure energy efficiency optimization for STAR-RIS-assisted near-field wideband THz communication[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025. doi: [10.1109/TGCN.2025.3541095](https://doi.org/10.1109/TGCN.2025.3541095).
- [26] TANG Jie, PENG Ziyao, SO D K C, *et al.* Energy efficiency optimization for a multiuser IRS-aided MISO system with SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(10): 5950–5962. doi: [10.1109/TCOMM.2023.3296631](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3296631).
- [27] SUTHAKAR B, AKASH S, KUMARAVELU V B, *et al.* Data rate maximization in IRS-aided downlink with effective positioning[C]. 2024 International Conference on Smart Electronics and Communication Systems, Kottayam, India, 2024: 1–6. doi: [10.1109/ISENSE63713.2024.10872271](https://doi.org/10.1109/ISENSE63713.2024.10872271).
- [28] YU Xianghao, XU Dongfang, and SCHÖBER R. Optimal beamforming for MISO communications via intelligent reflecting surfaces[C]. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Atlanta, USA, 2020: 1–5. doi: [10.1109/SPAWC48557.2020.9154337](https://doi.org/10.1109/SPAWC48557.2020.9154337).
- [29] NING Boyu, CHEN Zhi, CHEN Wenjie, *et al.* Beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted MIMO: A sum-path-gain maximization approach[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(7): 1105–1109. doi: [10.1109/LWC.2020.2982140](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2982140).
- [30] ZHU Wenhui, LI Beilun, WANG Xiaoqing, *et al.* Design of robust beamforming algorithm for intelligent reflecting surface-assisted MISO backscatter communication system[C]. 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Hefei, China, 2024: 1–4. doi: [10.1109/ISAPE62431.2024.10840581](https://doi.org/10.1109/ISAPE62431.2024.10840581).
- [31] LIU Tianji, ZHOU Hu, LONG Ruizhe, *et al.* Improving physical layer security with RIS-assisted symbiotic radio[C]. IEEE International Conference on Communications, Denver, USA, 2024: 593–598. doi: [10.1109/ICC51166.2024.10622723](https://doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10622723).
- [32] 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](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2981458).
- [33] HUANG Chongwen, ZAPPONE A, DEBBAH M, *et al.* Achievable rate maximization by passive intelligent mirrors[C]. 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Calgary, Canada, 2018: 3714–3718. doi: [10.1109/ICASSP.2018.8461496](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461496).
- [34] YUAN Jie, LIANG Yingchang, JOUNG Jingon, *et al.* Intelligent reflecting surface-assisted cognitive radio system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(1): 675–687. doi: [10.1109/TCOMM.2020.3033006](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3033006).
- [35] WANG Peilan, FANG Jun, YUAN Xiaojun, *et al.* Intelligent reflecting surface-assisted millimeter wave communications: Joint active and passive precoding design[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(12): 14960–14973. doi: [10.1109/TVT.2020.3031657](https://doi.org/10.1109/TVT.2020.3031657).
- [36] ABEYWICKRAMA S, ZHANG Rui, and YUEN C. Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), Dublin, Ireland, 2020: 1–6. doi: [10.1109/ICC40277.2020.9148961](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148961).
- [37] HAN Yu, TANG Wankai, JIN Shi, *et al.* Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019,

- 68(8): 8238–8242. doi: [10.1109/TVT.2019.2923997](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2923997).
- [38] ZHOU Xiaobo, ZHOU Xiuying, YAN Shihao, *et al.* Intelligent reflecting surface-aided covert wireless communications with finite-alphabet inputs[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(4): 6709–6714. doi: [10.1109/TVT.2024.3508819](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3508819).
- [39] MEI Yaowen, LI Na, and TAO Xiaofeng. A robust rate enhancement scheme for dual-RIS-aided air-ground integrated communication systems[C]. 2025 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies, Shenzhen, China, 2025: 212–217. doi: [10.1109/iWRFAT65352.2025.11103275](https://doi.org/10.1109/iWRFAT65352.2025.11103275).
- [40] XIE Daoyang, QIAO Jingping, MA Mingyu, *et al.* Secure terahertz communication with intelligent reflecting surface and energy harvesting[C]. 2025 IEEE International Workshop on Radio Frequency and Antenna Technologies, Shenzhen, China, 2025: 123–128. doi: [10.1109/iWRFAT65352.2025.11103407](https://doi.org/10.1109/iWRFAT65352.2025.11103407).
- [41] AWAD Y, AL-DHARRAB S, and MESBAH W. Performance analysis of RIS-assisted RF-based detection of unauthorized UAVs[J]. *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 2025, 6: 1963–1976. doi: [10.1109/OJVT.2025.3586263](https://doi.org/10.1109/OJVT.2025.3586263).
- [42] YUAN Jide, HUANG Huan, and JIN Shi. On the performance of frequency-mixing reconfigurable intelligent surfaces-aided system: Achievable rates and reflective patterns[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(4): 3117–3131. doi: [10.1109/TWC.2025.3528002](https://doi.org/10.1109/TWC.2025.3528002).
- [43] XI Zhipeng and JI Jianbo. Sum rate maximization for active RIS MISO systems based on DRL[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 4315–4325. doi: [10.1109/ACCESS.2025.3525562](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3525562).
- [44] YANG Shuo, XU Xiaorong, and BAO Jianrong. Secrecy rate based beamforming optimization strategy in IRS-assisted multiuser CR-SWIPT MIMO system[C]. 2024 China Automation Congress, Qingdao, China, 2024: 6030–6034. doi: [10.1109/CAC63892.2024.10865493](https://doi.org/10.1109/CAC63892.2024.10865493).
- [45] ZHANG Shuowen and ZHANG Rui. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1823–1838. doi: [10.1109/JSAC.2020.3000814](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000814).
- [46] CORNELIS S, NOELS N, and MOENECLAHEY M. Rate-maximizing zero-forcing hybrid Precoder for MU-MISO-OFDM[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 3275–3290. doi: [10.1109/ACCESS.2023.3234866](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234866).
- [47] YING Keke, GAO Zhen, LYU Shanxiang, *et al.* GMD-based hybrid beamforming for large reconfigurable intelligent surface assisted millimeter-wave massive MIMO[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 19530–19539. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2968456](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968456).
- [48] GUO Chang, LU Zhufei, GUO Zhe, *et al.* Maximum ergodic capacity of intelligent reflecting surface assisted MIMO wireless communication system[C]. 14th EAI International Conference of Communications and Networking, Shanghai, China, 2020: 331–343. doi: [10.1007/978-3-030-41114-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-41114-5_25).
- [49] XU Hao, NING Boyu, OUYANG Chongjun, *et al.* Spectral efficiency maximization for DMA-enabled multiuser MISO with statistical CSI[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(18): 39130–39144. doi: [10.1109/JIOT.2025.3588060](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3588060).
- [50] ZHANG Yu, ZHONG Caijun, ZHANG Zhaoyang, *et al.* Sum rate optimization for two way communications with intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(5): 1090–1094. doi: [10.1109/LCOMM.2020.2978394](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2978394).
- [51] YOU Changsheng, ZHENG Beixiong, and ZHANG Rui. Channel estimation and passive beamforming for intelligent reflecting surface: Discrete phase shift and progressive refinement[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(11): 2604–2620. doi: [10.1109/JSAC.2020.3007056](https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3007056).
- [52] RANJAN R, BHATTACHARYA A, MUKHOPADHYAY S, *et al.* A gradient ascent based low complexity rate maximization algorithm for intelligent reflecting surface-aided OFDM systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2023, 27(8): 2083–2087. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3289865](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3289865).
- [53] GUO Huayan, LIANG Yingchang, CHEN Jie, *et al.* Weighted sum-rate maximization for reconfigurable intelligent surface aided wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(5): 3064–3076. doi: [10.1109/TWC.2020.2970061](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2970061).
- [54] LIU Yihong, ZHANG Lei, YANG Bowen, *et al.* Programmable wireless channel for multi-user MIMO transmission using meta-surface[C]. 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Waikoloa, USA, 2019: 1–6. doi: [10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013433](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013433).
- [55] ZHOU Gui, PAN Cunhua, REN Hong, *et al.* Intelligent reflecting surface aided multigroup multicast MISO communication systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2020, 68(2): 3236–3251. doi: [10.1109/TSP.2020.2990098](https://doi.org/10.1109/TSP.2020.2990098).
- [56] PAN Cunhua, REN Hong, WANG Kezhi, *et al.* Multicell MIMO communications relying on intelligent reflecting surfaces[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(8): 5218–5233. doi: [10.1109/TWC.2020.2990766](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.2990766).
- [57] WU Zhaoyu and ZHANG Wei. Joint transmit and reflect beamforming design for active-RIS-assisted secure ISAC

- systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2025, 29(8): 1769–1773. doi: [10.1109/LCOMM.2025.3572794](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2025.3572794).
- [58] HUANG Shihan, WANG Weijiang, REN Shiwei, *et al.* Min-max fairness-based beamforming design for coupled phase shift STAR-RIS-assisted MIMO system[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(3): 3145–3162. doi: [10.1109/JIOT.2024.3477422](https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3477422).
- [59] YANG Gang, XU Xinyue, and LIANG Yingchang. Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access[C]. 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Seoul, Korea (South), 2020: 1–6. doi: [10.1109/WCNC45663.2020.9120476](https://doi.org/10.1109/WCNC45663.2020.9120476).
- [60] HU Sha, CHITTI K, RUSEK F, *et al.* User assignment with distributed large intelligent surface (LIS) systems[C]. IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bologna, Italy, 2018: 1–6. doi: [10.1109/PIMRC.2018.8580675](https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8580675).
- [61] YANG Yifei, ZHANG Shuowen, and ZHANG Rui. IRS-enhanced OFDMA: Joint resource allocation and passive beamforming optimization[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 760–764. doi: [10.1109/LWC.2020.2968303](https://doi.org/10.1109/LWC.2020.2968303).
- [62] ZHU Guangyu, MU Xidong, GUO Li, *et al.* STAR-RIS assisted SWIPT systems: Active or passive?[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025. doi: [10.1109/TWC.2025.3611793](https://doi.org/10.1109/TWC.2025.3611793).
- [63] RODRIGUES D V Q and SINGH T. Efficient power allocation strategies in hybrid active-passive reconfigurable intelligent surfaces[J]. *IEEE Communications Letters*, 2024, 28(1): 113–117. doi: [10.1109/LCOMM.2023.3332514](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3332514).
- [64] MU Xidong, LIU Yuanwei, GUO Li, *et al.* Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(5): 3083–3098. doi: [10.1109/TWC.2021.3118225](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3118225).
- [65] PANG Lihua, WANG Yue, ZHANG Yang, *et al.* Coverage optimization of hybrid active-passive STAR-RIS-assisted indoor-outdoor communication under hardware impairments and imperfect CSI[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(18): 37705–37719. doi: [10.1109/JIOT.2025.3584077](https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3584077).
- [66] CAI Yujin, YU Wenwu, NIE Xiaokai, *et al.* Double STAR-RIS enhanced secure wireless communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(8): 6596–6612. doi: [10.1109/TWC.2025.3554769](https://doi.org/10.1109/TWC.2025.3554769).
- [67] YANG Shaochuan, JIAO Yanzhen, WANG Yi, *et al.* Robust secure energy efficiency optimization for active STAR-RIS assisted ISAC systems[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 7459–7469. doi: [10.1109/OJCOMS.2025.3605726](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2025.3605726).
- [68] SHAHWAR M, AHMED M, HUSSAIN T, *et al.* Secure THz communication in 6G: A two-stage DRL approach for IRS-assisted NOMA[J]. *IEEE Access*, 2025, 13: 85294–85306. doi: [10.1109/ACCESS.2025.3569708](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3569708).
- [69] 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](https://doi.org/10.1109/MSP.2021.3130549).
- [70] DING Tongyu, FANG Linying, LIU Lu, *et al.* Design of an ultrawide-angle programmable metasurface based on hexagonal grid for 5G millimeter-wave applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2025, 24(10): 3764–3768. doi: [10.1109/LAWP.2025.3603886](https://doi.org/10.1109/LAWP.2025.3603886).
- [71] ZHAO Huijin, FAN Fei, JI Yunyun, *et al.* Active terahertz beam manipulation with photonic spin conversion based on a liquid crystal Pancharatnam-Berry metadvice[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(11): 2658–2666. doi: [10.1364/PRJ.471282](https://doi.org/10.1364/PRJ.471282).
- [72] 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](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3231893).
- [73] LIU Yuanwei, XU Jiaqi, WANG Zhaolin, *et al.* Simultaneously transmitting and reflecting (STAR)RISs for 6G: Fundamentals, recent advances, and future directions[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2023, 24(12): 1689–1707. doi: [10.1631/FITEE.2300490](https://doi.org/10.1631/FITEE.2300490).
- [74] BASHARAT S, HASSAN S A, MAHMOOD A, *et al.* Reconfigurable intelligent surface-assisted backscatter communication: A new frontier for enabling 6G IoT networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022, 29(6): 96–103. doi: [10.1109/MWC.009.2100423](https://doi.org/10.1109/MWC.009.2100423).
- [75] SONG Lizhao, SQUIRES A, VAN DER LAAN T, *et al.* THz graphene-integrated metasurface for electrically reconfigurable polarization conversion[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(13): 2349–2359. doi: [10.1515/nanoph-2023-0916](https://doi.org/10.1515/nanoph-2023-0916).
- 邢智童：男，讲师，研究方向为无线通信传输、大规模MIMO和智能反射面。
- 李云：男，教授，研究方向为蜂窝通信、智能反射面和边缘计算。
- 吴广富：男，副教授，研究方向为卫星通信和大规模MIMO系统。
- 夏士超：男，讲师，研究方向为大规模MIMO系统和边缘计算。

责任编辑：余蓉

# A Review on Phase Rotation and Beamforming Scheme for Intelligent Reflecting Surface Assisted Wireless Communication Systems

XING Zhitong<sup>①</sup>   LI Yun<sup>①②</sup>   WU Guangfu<sup>①②</sup>   XIA Shichao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications; Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(School of Computer Science and Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications; Chongqing 400065, China)

## Abstract:

**Objective** Since the large-scale commercial deployment of 5G networks in 2020 and the continued development of 6G technology, modern communication systems need to function under increasingly complex channel conditions. These include ultra-high-density urban environments and remote areas such as oceanic regions, deserts, and forests. To meet these challenges, low-energy solutions capable of dynamically adjusting and reconfiguring wireless channels are required. Such solutions would improve transmission performance by lowering latency, increasing data rates, and strengthening signal reception, and would support more efficient deployment in demanding environments. The Intelligent Reflecting Surface (IRS) has gained attention as a promising approach for reshaping channel conditions. Unlike traditional active relays, an IRS operates passively and adds minimal energy consumption. When integrated with communication architectures such as Single Input Single Output (SISO), Multiple Input Single Output (MISO), and Multiple Input Multiple Output (MIMO), an IRS can improve transmission efficiency, reduce power consumption, and enhance adaptability in complex scenarios. This paper reviews IRS-assisted communication systems, with emphasis on signal transmission models, beamforming methods, and phase-shift optimization strategies.

**Methods** This review examines IRS technology in modern communication systems by analyzing signal transmission models across three fundamental configurations. The discussion begins with IRS-assisted SISO systems, in which IRS control of incident signals through reflection and phase shifting improves single-antenna communication by mitigating traditional propagation constraints. The analysis then extends to MISO and MIMO architectures, where the relationship between IRS phase adjustments and MIMO precoding is assessed to determine strategies that support high spectral efficiency. Based on these transmission models, this review surveys joint optimization and precoding methods tailored for IRS-enhanced MIMO systems. These algorithms can be grouped into four categories that meet different operational requirements. The first aims to minimize power consumption by reducing total energy use while maintaining acceptable communication quality, which is important for energy-sensitive applications such as IoT systems and green communication scenarios. The second seeks to maximize energy efficiency by optimizing the ratio of achievable data rate to power consumption rather than lowering energy use alone, thereby improving performance per unit of energy. The third focuses on maximizing the sum rate by increasing aggregated throughput across users to strengthen overall system capacity in high-density 5G and 6G environments. The fourth prioritizes fairness-aware rate maximization by applying resource allocation methods that ensure equitable bandwidth distribution among users while sustaining high Quality of Service (QoS). Together, these optimization approaches provide a framework for advancing IRS-assisted MIMO systems and allow engineers and researchers to balance performance, energy efficiency, and user fairness according to specific application needs in next-generation wireless networks.

**Results and Discussions** This review shows that IRS assisted communication systems provide important capabilities for next-generation wireless networks through four major advantages. First, IRS strengthens system performance by reconfiguring propagation environments and improving signal strength and coverage in non-line-of-sight conditions, including urban canyons, indoor environments, and remote regions, while also maintaining reliable connectivity in high-mobility cases such as vehicular communication. Second, the technology supports high energy efficiency because of its passive operation, which adds minimal power overhead yet improves spectral efficiency. This characteristic is valuable for sustainable large-scale IoT deployments and

green 6G systems that may incorporate energy-harvesting designs. Third, IRS shows strong adaptability when integrated with different communication architectures, including SISO for basic signal enhancement, MISO for improved beamforming, and MIMO for spatial multiplexing, enabling use across environments ranging from ultra-dense urban networks to remote or airborne communication platforms. Finally, recent progress in beamforming and phase-shift optimization strengthens system performance through coherent signal combining, interference suppression in multi-user settings, and low-latency operation for time-critical applications. Machine learning methods such as deep reinforcement learning are also being investigated for real-time optimization. Together, these capabilities position IRS as a key technology for future 6G networks with the potential to support smart radio environments and broad-area connectivity, although further study is required to address challenges in channel estimation, scalability, and standardization.

**Conclusions** This review highlights the potential of IRS technology in next-generation wireless communication systems. By enabling dynamic channel reconfiguration with minimal energy overhead, IRS strengthens the performance of SISO, MISO, and MIMO systems and supports reliable operation in complex propagation environments. The surveyed signal transmission models and optimization methods form a technical basis for continued development of IRS-assisted communication frameworks. As research and industry move toward 6G, IRS is expected to support ultra-reliable, low-latency, and energy-efficient global connectivity. Future studies should address practical deployment challenges such as hardware design, real-time signal processing, and progress toward standardization.

**Key words:** Intelligent Reflecting Surface(IRS); Beamforming; Phase rotation scheme; Signal transmission