



专题：6G

## 智能超表面在波束及信息调控中的应用

程强<sup>1</sup>, 戴俊彦<sup>2</sup>, 柯俊臣<sup>1</sup>, 梁竟程<sup>1</sup>, 王思然<sup>1</sup>

(1. 东南大学, 江苏 南京 210007; 2. 香港城市大学, 香港 999077)

**摘要:** 现代移动通信中无线信道的随机性、不确定性和不可控性是影响通信质量的关键因素, 往往会导致接收端信号质量降低, 从而限制了信息传输的速率与范围。目前正兴起的 6G 技术研究中, 智能超表面是被积极讨论的研究方向之一, 其是由亚波长结构组成的超薄人工表面, 具有现场可编程能力和时空信息调制能力, 可精准、高效地操控电磁波, 可被用于重塑无线传播环境。通过对智能超表面的概念、基于时空调制的波束调控方法、基于智能超表面的无线中继以及通信系统 4 个方面的综述和分析, 展示了智能超表面在辅助移动通信中具有的应用潜力, 为 6G 的发展提供了新的思路。

**关键词:** 6G; 智能超表面; 波束调控; 直接调制; 无线中继

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2021226

## Application of reconfigurable intelligent surface in beamforming and information modulation

CHENG Qiang<sup>1</sup>, DAI Junyan<sup>2</sup>, KE Junchen<sup>1</sup>, LIANG Jingcheng<sup>1</sup>, WANG Siran<sup>1</sup>

1. Southeast University, Nanjing 210007, China

2. City University of Hongkong, Hongkong 999077, China

**Abstract:** In modern mobile communications, the randomness, uncertainty, and uncontrollability of wireless channels are the pivotal factors that affect the communication quality, which often leads to the deterioration of the signal quality at the receiving terminal, and thereby limiting the rate and range of information transmission. In the emerging study of 6G technology, reconfigurable intelligent surface is one of the research directions under active discussions, which is an ultra-thin artificial surface composed of sub-wavelength structures with field programmability and spatiotemporal information modulation capabilities. The reconfigurable intelligent surface can manipulate electromagnetic waves accurately and efficiently, thus providing the possibility for reshaping the wireless propagation environment. In this review, the concept of the reconfigurable intelligent surface, the beam forming method based on spatiotemporal modulation, the wireless relay and the communication system based on the reconfigurable intelligent surface were re-

收稿日期: 2021-06-18; 修回日期: 2021-09-10

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (No.2017YFA0700201, No.2017YFA0700202, No.2017YFA0700203); 国家自然科学基金资助项目 (No.61631007, No.61571117, No.61138001, No.61371035, No.61722106, No.61731010, No.11227904); “111”项目 (No.111-2-05)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFA0700201, No.2017YFA0700202, No.2017YFA0700203), The National Natural Science Foundation of China (No.61631007, No.61571117, No.61138001, No.61371035, No.61722106, No.61731010, No.11227904), The 111 Project (No.111-2-05)

viewed and discussed. It demonstrates the great potential of reconfigurable intelligent surface in assisting mobile communication, and provides new ideas for the development of 6G.

**Key words:** 6G, reconfigurable intelligent surface, beamforming, direct modulation, wireless relay

## 1 引言

未来的通信系统对时延、吞吐量以及可靠性等方面提出了更高的要求,特别是在未来的大规模工业物联网以及车联网应用中,大量需求还未得到满足。在当下 5G 系统部署中,成本、能耗以及系统设计复杂度还存在诸多不足,其在实际应用中还存在许多问题。面向 6G 超大规模 MIMO 和太赫兹无线通信,传统无线收/发机硬件架构面临高复杂度、高成本、高能耗等挑战,因此探索新体制收/发机架构具有重要意义。传统无线通信系统无法主动控制无线信道环境,只能通过信道测量建立信道模型并设计收/发机算法。探索突破传统无线信道不可控特性,重塑无线传播环境,进而大幅提升无线通信系统性能,将为无线通信的发展提供新的可能。

智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)是一种在亚波长尺度上设计结构单元,并安排单元的排列组合以实现操控电磁波的幅度、相位、极化和频率等信息的二维人工表面。通过使用二进制数字“0”和“1”对智能超表面的单元编码,其中“0”或“1”可代表单元不同的电磁参数,如反/透射幅度、相位、极化等,从而将电磁波在智能超表面的电磁响应数字化,以便于智能超表面的优化和设计<sup>[1]</sup>。智能超表面单元上通常加载有高速电响应器件(如 PIN 管、变容管和 MEMS 开关等),因此可以简单、灵活、快速地控制智能超表面单元在“0”或“1”状态间切换,且损耗极低。在此基础上,通常还会利用 FPGA、单片机等成熟的数控手段,将相应的编码序列输送给智能超表面用以调控智能超表面各单元的编码状态,进而实现远场方向图的实时现场可编程操作,或是直接对入射电磁波进行幅度、相位调制,从而构成新型的发射机系

统,这样的发射机系统无须混频器和滤波器,降低了对功放带宽性能要求。

通过在智能超表面形成特定的编码序列,可以使入射智能超表面的电磁波发生异常反射和异常折射等电磁现象。基于傅里叶变换理论中的时移特性,将智能超表面的控制信号进行适当的延时,可实现独立调控谐波幅度/相位的方法,与传统空间编码相结合后,可以实现电磁波特定的谐波方向图与强度的独立调控(图 1(a))<sup>[2]</sup>。若在不同时间序列上快速切换智能超表面上的编码,使得其反射相位线性变化,可以实现对入射智能超表面电磁波的特定谐波的高效生成,从而实现非线性调制(图 1(b))<sup>[3]</sup>。加入了时间维度的智能超表面的功能得到了极大的提升,这不仅使得部署有智能超表面的无线通信系统可以动态地改变无线通信信道,提高无线通信的性能,构成低损耗多终端的无线中继(图 1(c))<sup>[4]</sup>,还可以构建基于智能超表面的无线通信发射机(图 1(d))<sup>[5]</sup>,为下一代无线通信提供新方案。

智能超表面可以用标准的 PCB 工艺加工制造,其背面是一块完整的金属层,用来反射电磁波;中间是一层低损耗的介质板,用来隔离金属背板和表层金属贴片;其表面上的单元加载了高速电响应元器件,用以调控入射到智能超表面上的电磁波的幅度、相位等物理信息。智能超表面会利用 PIN 管的断开和导通两个状态分别实现单元的“0”和“1”相位状态,或是利用变容管的电容随反向电压变化的特性连续地改变单元的相位响应,从而构成多比特的相位编码智能超表面,也可以利用 PIN 管在半导通状态下电阻随电压连续变化的特性改变单元的幅度响应,从而构成多比特的幅度编码智能超表面。相较于传统的电磁超表面,智能超表面的优点在于可以利用其中的

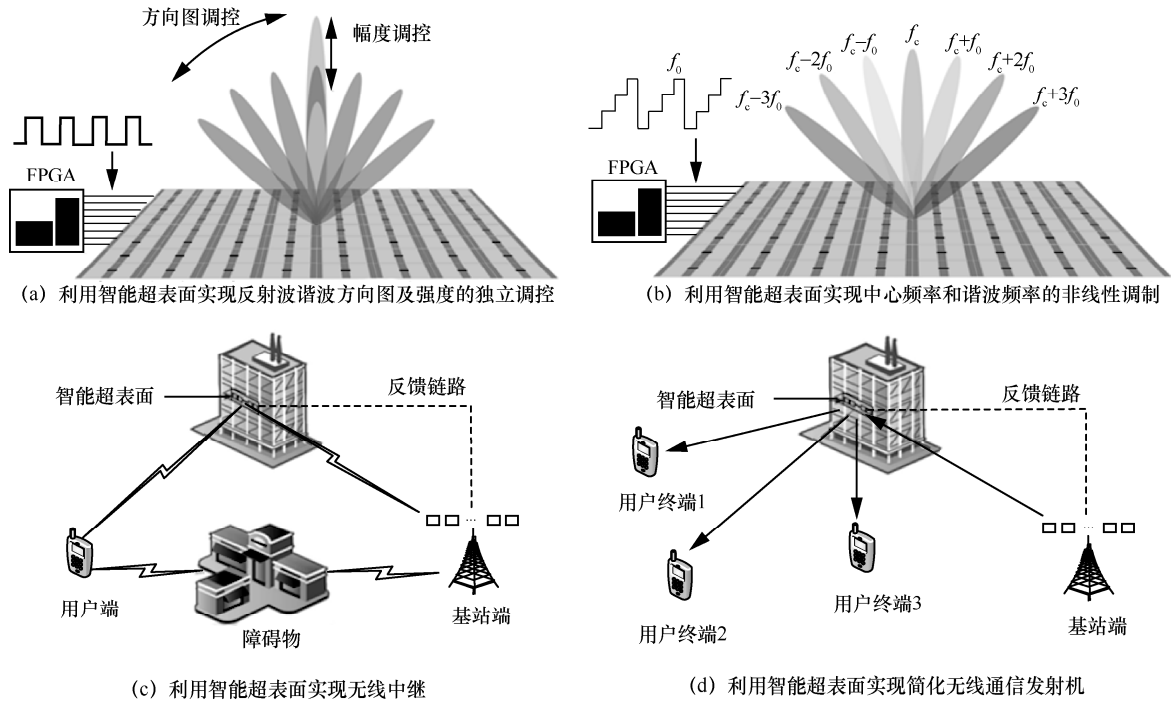


图1 智能超表面的应用场景

高速电响应元器件实现智能超表面单元电磁响应的实时变化，从而可以快速改变通信信道环境，提高通信系统的性能和能效。

## 2 基于时空调制的波束调控方法

在智能超表面中，可以将反射相位相差  $180^\circ$  的两个状态分别编码为“0”和“1”（以 1 bit 编码为例）。根据文献[6]，不同的空间编码序列（如 01010101/1110001）可以形成不同的电磁波波前，即空间电磁波束。

智能超表面除了可以定义在空间域，即使超表面单元的状态在一个调制周期内保持不变。也可以进一步扩展到时间域，即通过现场可编程门阵列（FPGA），引入周期性的控制信号，使超表面单元的状态在一个调制周期内产生多次变化。具体而言，在平面波垂直入射下，时间调制的智能超表面散射场可以表示为<sup>[3,7]</sup>：

$$E_r(t) = E_i(t)\Gamma(t) \quad (1)$$

其中， $E_i$  表示入射电磁场， $\Gamma(t)$  表示超表面单元

时变的反射系数。这里仅对反射系数的相位进行调制，假设其幅度不变。对式（1）做傅里叶变换，智能超表面的散射场在频域内可以表示为：

$$E_r(f) = E_i(f) * \Gamma(f) = \delta(f - f_c) * \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \delta(f - kf_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \delta(f - kf_0 - f_c) \quad (2)$$

其中， $\delta$  表示冲击函数， $*$  表示卷积操作符， $f_c$  表示入射电磁波频率， $f_0$  表示周期调制频率， $a_k$  表示  $k$  阶谐波对应的傅里叶系数。一般而言，入射电磁波频率远大于单元的周期调制频率。此外，第  $k$  阶谐波幅度可以通过傅里叶变换得到：

$$a_k = \frac{1}{T} \int_0^T \Gamma(t) e^{-jk2\pi f_0 t} dt \quad (3)$$

其中， $T$  表示调制频率周期。根据式（2）和式（3），通过设计单元反射系数，可以对电磁波谱进行调控，这说明智能超表面已经将对电磁波的控制能力从空间域扩展到了频域。

同时在空间域和频域对电磁波进行调控的智能超表面, 即时空调制的智能超表面<sup>[8]</sup>。以包含  $M \times N$  个编码单元的时空调制智能超表面为例, 如图 2 所示, 在平面电磁波垂直入射的条件下, 时空调制的智能超表面电磁波散射方向图, 可表示为:

$$f(\theta, \varphi, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N E^{mn}(\theta, \varphi) \Gamma^{mn}(t) e^{j \frac{2\pi f_c}{v} d \{ (n-1) \sin \theta \cos \varphi + (m-1) \sin \theta \sin \varphi \}} \quad (4)$$

其中,  $\theta$  和  $\varphi$  分别表示俯仰角和方位角,  $E^{mn}(\theta, \varphi)$  表示单元的散射方向图,  $d$  表示单元间距,  $\Gamma^{mn}(t)$  表示单元的反射系数,  $v$  表示光速。进一步, 结合式 (3), 可以得到时空调制智能超表面的第  $k$  阶谐波散射方向图, 可表示为:

$$f_k(\theta, \varphi) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N a_k^{mn} e^{j \frac{2\pi f_c}{v} d \{ (n-1) \sin \theta \cos \varphi + (m-1) \sin \theta \sin \varphi \}} \quad (5)$$

其中,  $a_k^{mn}$  表示不同单元在第  $k$  阶谐波处的傅里叶系数。

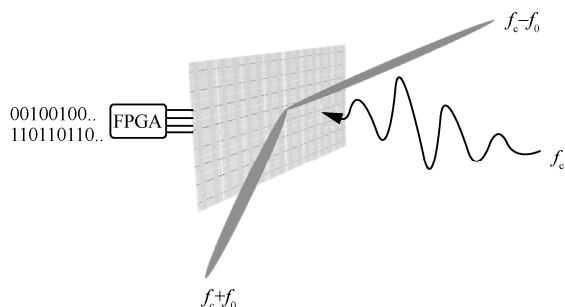


图2 时空调制的智能超表面概念示意图

由广义斯涅耳定律可知, 空间散射电磁波波前的方向取决于智能超表面上的相位分布。因此, 对于第  $k$  阶散射谐波的波束控制, 根据式 (5), 可以通过设计不同单元在第  $k$  阶谐波处的傅里叶系数 ( $a_k^{mn}$ ) 实现。进一步地, 依据同样的流程, 配合一定的优化算法<sup>[8-9]</sup>, 可以同时设计在不同阶谐波处单元所对应的傅里叶系数, 进而同时对不同阶谐波波束进行调控。时空调制的智能超表面

可以同时控制电磁波, 这不仅增加了对电磁波控制的维度, 也相应地增加了其处理更复杂、更多样信息的能力。

### 3 基于智能超表面的无线中继

智能超表面通过调控其亚波长单元可以实现对电磁波传播特性的智能控制, 从而重新配置无线电磁环境, 成为一种被广泛讨论的新兴技术, 在提高移动通信系统传输速率、覆盖范围以及能量效率方面具有巨大潜力。如图 3 所示, 通过调控在无线信道中智能超表面各单元的反射相位, 经过智能超表面反射与其他路径传播的信号最终在用户端得以同相叠加, 以增强接收信号功率, 提高信噪比。传统的无线中继技术方案通常在半双工模式或全双工模式工作。其中, 半双工模式是指中继器不同时或在不同频率处对信号进行接收和发送, 该方案的主要缺陷在于需要两个正交信道进行接收和发送, 以及因此造成的频谱效率的恶化。而在全双工模式中, 中继器能够同时接收和发送信号, 并不会恶化频谱效率。然而, 由于发送端的大功率信号会不可避免地耦合到中继器的接收端, 产生自干扰现象, 从而严重限制了中继器的性能。而基于智能超表面的无线中继方案既能够避免自干扰现象的产生, 又能工作在全双工模式, 加之智能超表面具有体积小、能耗低、成本低、易部署等优点, 因而在无线中继中具有很大的发展潜力。

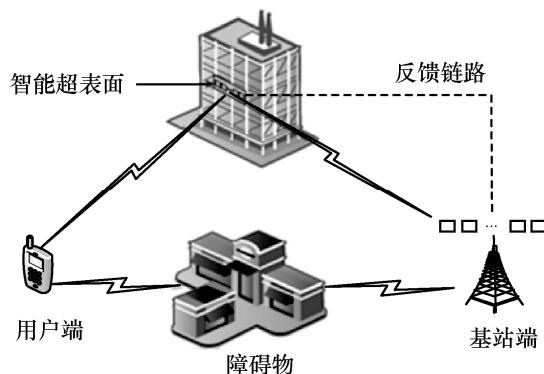


图3 基于智能超表面的无线中继



关于智能超表面在无线中继中的应用, 已有很多相关的研究成果。其中, 文献[10]通过研究智能超表面的物理和电磁特性, 首次建立了不同场景智能超表面在无线通信链路中的自由空间路径损耗模型。研究者们使用 3 个不同尺寸的超表面进行了实验测量, 分别讨论了智能超表面自由空间路径损耗与智能超表面的物理尺寸、智能超表面的近场/远场效应、超表面单元散射方向图, 以及超表面与信号发射/接收端的距离之间的关系, 为智能超表面融入无线通信链路框架提供了重要的理论指导。文献[11]研究了智能超表面辅助中继的单小区无线通信系统, 通过单个智能超表面改善多天线接入点和多个单天线用户之间的通信质量。在同样的用户端接收信噪比条件下, 通过联合优化接入点天线阵列的发射方向图与智能超表面的反射方向图, 最小化接入点的总发射功率。在这一体系架构中, 智能超表面主要用于增强现有的通信链路性能, 并不会增加额外信息, 原有的直接路径信号和经超表面反射的辅助路径信号均携带相同的信息, 可以在接收端进行相干增强, 从而最大化接收功率。除了通过相干增强接收信号, 智能超表面也能利用相干对消抑制不需要的信号, 文献[12]通过调控智能超表面的反射相位分布, 在增强期望信号的同时抑制了不期望信号, 可以很大限度地提高通信链路的保密性。文献[13]中提出了智能空间的概念, 其特征就在于可编程的无线环境, 可以在无线空间中改善所需的链路质量。通过在建筑物的墙壁中嵌入低成本的超表面器件, 在实验中验证了改变无线信道的可行性, 将原有  $2 \times 2$  MIMO 信道的信号强度增强了 26 dB。

#### 4 基于智能超表面的通信系统

由数字可编程超表面发展、衍生而成的智能超表面, 其典型的应用之一是构建一种全新架构

的新型无线通信系统。作为智能超表面的一项重要应用分支, 基于智能超表面的新体制无线通信系统可以直接在超表面上处理数字信息, 即基带信号可以通过超表面直接调制到载波上, 而无须额外的电路级数模转换、调制及混频过程。理论分析表明, 智能超表面通过设计时变的反/透射系数, 在精确设计电磁波的幅度谱和相位谱方面具有强大的能力<sup>[6]</sup>。因此, 基于智能超表面的新体制无线通信是通过建立基带信号和时变的反/透射系数之间的映射关系实现的。

灵活设计具有周期性的时变反/透射系数, 可以实现电磁波谱几个关键特征参数的自由调控, 包括电磁波的幅度、相位、频率、极化等。文献[3]中提出了一种具有二进制频移键控(BFSK)调制方案的新架构无线通信系统, 其中智能超表面可以通过改变时间编码序列将能量从载频传输到 $\pm 1$ 阶谐波频率, 从而实现 BFSK 通信系统。图 4(a)所示为基于智能超表面的 BFSK 无线通信系统发射机的原理。其信息传输过程主要包括 3 个步骤。首先, FPGA 基带模块生成原始信息(如照片、视频等)的比特流; 其次, 将比特流映射到不同的时间编码序列集, 可以产生 BFSK 方案所需的特定谐波分布; 最后, 入射波被时间编码序列调制, 由智能超表面传输携带数字信息的调制电磁波。实验结果展示如图 4(b)所示, 其中传输的信息源(图片)被无线接收机成功接收并完好恢复, 信息的传输速率为 78.125 kbit/s, 频率为 3.6 GHz。

上述 BFSK 通信系统实验性地验证了基于智能超表面的新体制无线通信系统的可行性, 但其传输速率较低、能量利用率低。为了进一步提高传输速率, 文献[7]提出了一种正交相移键控(QPSK)调制方案的无线通信系统。QPSK 系统中智能超表面实物图和不同发射功率下测量的星座图结果如图 4(c)所示, 从实测中可以看出系

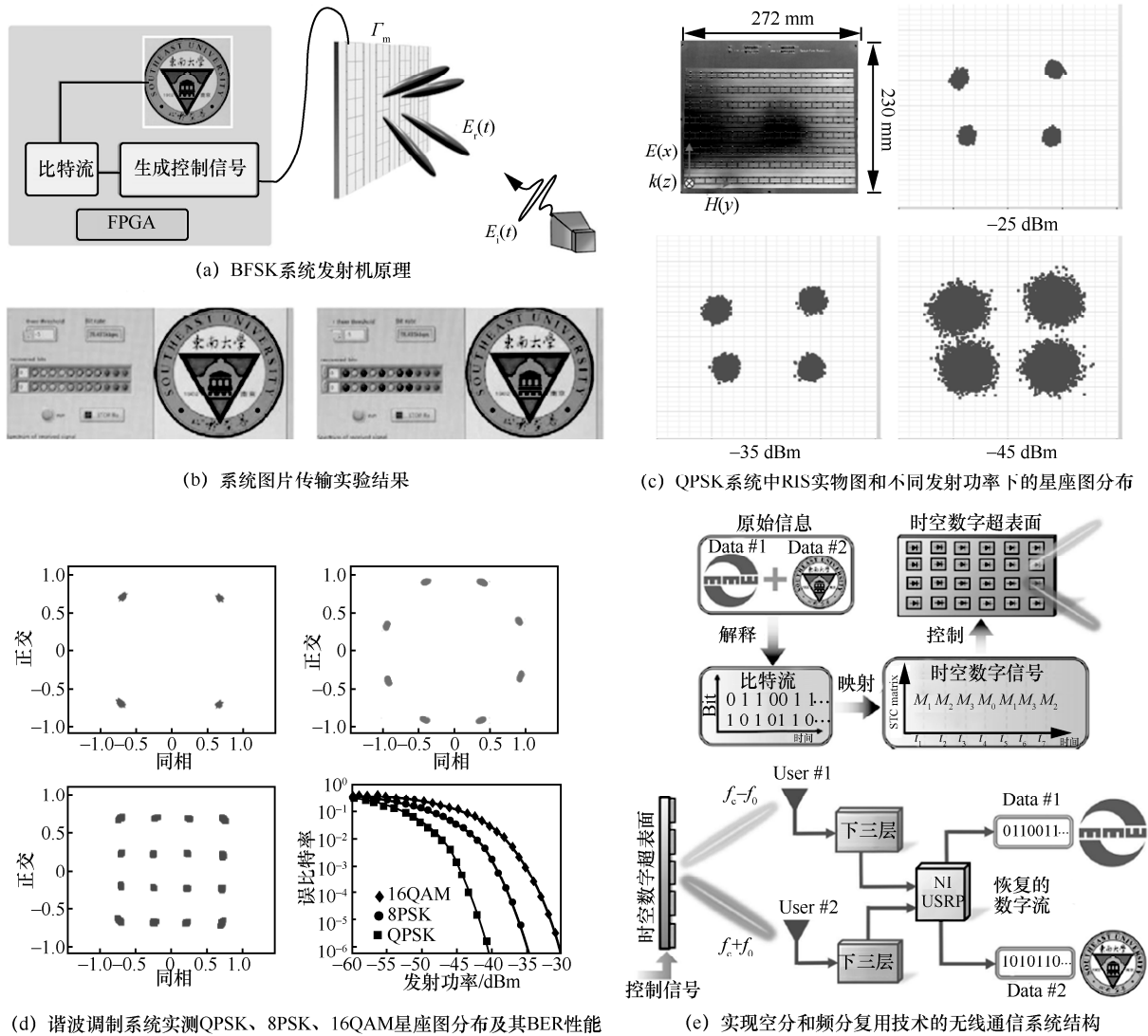


图4 智能超表面在无线通信系统中的应用

统的4个星座点清晰可分辨。最终, QPSK无线通信系统可以在4 GHz频率下, 以1.6 Mbit/s的信息传输速率流畅地传输一段高分辨率视频文件。在此基础上, 为了实现符合理论标准的星座图分布以及一些高阶调制方案(如8PSK、16QAM等), 文献[5,14,15]相继提出了一种基于智能超表面的谐波调制方法: 通过调节智能超表面的时变反射相位波形, 在+1阶谐波频率处合成任意的星座图。在对不同调制方案的实验验证中, 文献[15]制作了一种工作在4.25 GHz频率附近的智能超表

面, 可实现4.25 GHz频率下反射相位具有 $360^\circ$ 相位全覆盖。图4(d)中分别展示了基于上述智能超表面的无线通信系统所合成的QPSK、8PSK和16QAM的星座图。此外, 为了衡量发射机的通信性能, 该工作还测量了3种调制方案不同发射功率对应的误比特率性能。最终, 该系统可以在4.25 GHz处以16QAM实现10 Mbit/s的通信速率。从这些测试结果中可以看出, 相比于之前的智能超表面通信系统, 该系统在传输速率、星座图分布和BER特性等无线通信的关键性能上都



有了长足的进步。

然而,上文所述的基于智能超表面的无线通信系统并未涉及空域调制。因此,文献[9]进一步提出了基于空时编码(STC)的智能超表面,可以在空间域中通过信息编码来实现可调控的空间信息分配,提高通信容量。基于该智能超表面构建的无线通信系统可以在多信道无线通信系统中实现空分和频分复用技术:通过对优化的STC矩阵进行编码,不同的数字消息可以同时独立直接地传输给多个用户,从而建立了直接数据传输的多通道无线通信系统,如图4(e)所示。在这种情况下,不同的数据流直接发送到位于不同方向的指定用户。每个指定用户通过特定频率拥有独立的接收信道,而位于其他方向的不想要的用户无法恢复正确的信息。为了进行实验验证,构建了一个双通道无线通信系统,将两张不同的图片传输给两个用户,如图4(e)所示。实测结果表明,两幅不同的图像以高传输速率同时传输给两个不同用户,验证了空间和频率复用信息编码方案的可行性。

总体而言,仿真和实验结果均有效证明了新架构无线通信系统的良好性能,简化了传统无线通信系统的架构,在未来的6G通信场景中具有广阔的应用前景。

## 5 结束语

随着6G的研究在全球范围内逐渐展开,智能超表面因其独特的电磁调控特性和简单的硬件架构,成为一种极具潜力的新技术,可用于改善信道环境、实现信息调制、提高系统性能和降低搭建成本,促进了新一代无线通信技术的发展与应用。

## 参考文献:

- [1] CUI T J, LI L L, LIU S, et al. Information metamaterial systems[J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101403.
- [2] DAI J Y, ZHAO J, CHENG Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface[J]. *Light: Science & Applications*, 2018(7): 90.
- [3] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems[J]. *National Science Review*, 2019, 6(2): 231-238.
- [4] HAN Y, TANG W K, JIN S, et al. Large intelligent surface-assisted wireless communication exploiting statistical CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(8): 8238-8242.
- [5] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(7): 417-420.
- [6] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218.
- [7] DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(7): 1900044.
- [8] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018(9): 4334.
- [9] ZHANG L, CHEN M Z, TANG W K, et al. A wireless communication scheme based on space and frequency division multiplexing using digital metasurfaces[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(3): 218-227.
- [10] 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.
- [11] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(11): 5394-5409.
- [12] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(5): 1410-1414.
- [13] WELKIE A, SHANGGUAN L F, GUMMESON J, et al. Programmable radio environments for smart spaces[C]// *Proceedings of the 16th ACM Workshop on Hot Topics in Networks*. New York: ACM Press, 2017.
- [14] TANG W K, LI X, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and expe-

- rimental results[J]. China Communications, 2019, 16(5): 46-61.
- [15] DAI J Y, TANG W K, YANG L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 1618-1627.

#### [作者简介]



**程强** (1979—)，男，东南大学信息科学与工程学院教授，主要研究方向为超材料的物理机理、设计理论及其在通信、雷达和天线中的应用。



**戴俊彦** (1991—)，男，博士，香港城市大学毫米波与太赫兹国家重点实验室在站博士后，主要研究方向为时空调制智能超表面、基于智能超表面的无线通信系统、测向系统的原型验证。



**柯俊臣** (1995—)，男，东南大学博士生，主要研究方向为可编程超表面、阵列天线和基于智能超表面的无线通信系统。



**梁竞程** (1994—)，男，东南大学博士生，主要研究方向为智能超表面单元设计。



**王思然** (1993—)，男，东南大学博士生，主要研究方向为时空调制智能超表面和基于智能超表面的无线通信系统。