

基于信息超表面的无线通信 (特邀)

梁竞程¹, 陈伟聪², 程 强¹, 金 石², 崔铁军¹

1. 东南大学 信息科学与工程学院 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096;
2. 东南大学 信息科学与工程学院 移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096)

摘要: 信息超表面由于其强大的处理空间电磁波的能力, 成为国内外物理和信息领域的研究热点之一。文中主要介绍信息超表面在无线通信领域的一系列研究进展。信息超表面能实时操控电磁波及直接处理数字编码信息, 并进一步对信息进行感知、理解, 甚至记忆、学习和认知, 这使其在无线通信领域展现出巨大潜能。文中首先介绍信息超表面在承担无线中继职能时所涉及的信道建模研究进展、以及其对信道的改善作用; 其次介绍信息超表面在新体制发射机中的应用, 通过对入射到信息超表面上的载波进行幅度或相位调制, 实现了多种简化的发射机架构。此外, 文中还介绍了利用信息超表面近场、远场以及散射场等信息, 实现了多种新型无线通信系统。最后, 文章对基于信息超表面的无线通信进行了总结和展望。

关键词: 超材料; 信息超表面; 无线通信

中图分类号: O441.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210797

Wireless communications based on information metasurfaces (*Invited*)

Liang Jingcheng¹, Chen Weicong², Cheng Qiang¹, Jin Shi², Cui Tiejun¹

1. State Key Laboratory of Millimeter Wave, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. National Mobile Communications Research Laboratory, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Information metasurfaces have become one of the research hotspots in the field of physics and information, because of the ability of manipulating electromagnetic waves. A series of research progress in the field of wireless communications based on information metasurfaces was introduced. Information metasurface can manipulate electromagnetic waves in real time and directly process digital coding information, and can further perceive, understand, even memorize, learn and recognize information, which makes it show great potential in the field of wireless communications. Firstly, the research progress of channel modeling was introduced and the channel improvement that information metasurfaces could achieve when they worked as a wireless relay. Secondly, the application of information metasurface in the new transmitter system was also introduced, which

收稿日期: 2021-10-29; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2017 YFA0700201, 2017 YFA0700202, 2017 YFA0700203); 国家自然科学基金 (61631007, 61571117, 61138001, 61371035, 61722106, 61731010)

作者简介: 梁竞程, 男, 博士生, 主要从事智能超表面设计和应用等方面的研究。

陈伟聪, 男, 博士生, 主要从事毫米波、MIMO 以及智能超表面辅助通信方面的研究。

导师简介: 程强, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事人工电磁材料、天线、微波毫米波成像、射频电路、雷达系统等方面的研究。

金石, 男, 教授, 博士, 主要从事 5G/B5G 移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术以及机器学习与大数据处理在移动通信中的应用等方面的研究。

崔铁军, 男, 东南大学首席教授, 中国科学院院士, 主要从事电磁超材料、计算电磁学方面的研究。

modulated the amplitude or phase of the carrier waves. Thus several simplified transmitter architectures could be realized. Thirdly, the realization of several new wireless communication systems using the information of the near field, far field and scattering field of the information metasurface was introduced. Finally, the future wireless communication based on information metasurface was summarized and prospected.

Key words: metamaterial; information metasurfaces; wireless communications

0 引言

超材料 (Metamaterial) 是一种将亚波长尺度人工原子按照特定空间结构排列而成的人工电磁媒质。超材料具有自然界中不存在或很难获取的媒质参数, 因此可以实现全新的物理现象和工程应用, 例如负折射^[1-3]、电磁隐身衣^[4-6]、完美透镜^[3, 7]、超分辨率成像^[8]、幻觉光学^[9-23]等。作为二维版本的超材料, 超表面 (Metasurface) 具有易加工、成本低、重量轻的优点, 非常适合大规模生产和应用, 因此一经提出就引起了广泛的关注^[12-22]。

2014 年, 崔铁军院士团队提出了数字编码超材料的概念^[23]。数字编码超材料概念用离散的数字状态表征超材料的电磁特性, 彻底摒弃了传统等效媒质参数的表征方法, 用数字化的方式实现电磁信息的调控。在数字编码超表面的基础上引入可调器件和数字可编程模块进而提出了可重构数字超表面的概念, 从而克服了传统超表面一旦制造后功能固化的缺点, 使得可重构数字超表面具备了可实时动态调节电磁功能的能力^[24-31]。随后, 崔铁军院士等在 *Journal of Materials Chemistry C* 中的一篇综述论文^[32]中首次提出信息超表面的概念, 信息超表面将可重构数字超表面与信息科学有机结合, 为超表面在无线通信领域的应用奠定了基础。

信息社会的飞速发展对无线通信系统的速度、容量和稳定性等提出了越来越高的需求, 对于传统无线通信系统的成本、性能和设计复杂度也提出了越来越高的要求。随着第六代无线通信 (6G) 研究的逐渐深入, 信息超表面由于其低成本、低复杂度、低功耗、高精度等优势, 或许将成为 6G 可能的使能技术之一^[33-35]。

信息超表面在无线通信领域主要有两个应用方向, 一是将信息超表面作为发射机和接收机之间的低成本无线中继, 实现对无线信道的改善甚至定制; 二是利用信息超表面作为发射机中的重要组成部分实现简化无线通信系统架构和新型无线通信系统架

构。前者在无线通信中又被称为 Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) 或 Intelligent Reflecting Surface (IRS), 通过其对空间电磁波相位的调控, 实现电磁波在接收机端的同向叠加以增强接收信号或反向叠加以消除干扰; 而后者利用信息超表面可快速直接调制电磁波波前和快速改变电磁波近远场和散射场的能力, 可搭建简化的发射机架构和新型系统架构, 从而达到节省系统中射频模块的开销、简化系统构成、扩大通信容量和提高通信保密性等目的, 并且具有低成本、低复杂度、低功耗、易集成、速率高等优点。

文中主要介绍了信息超表面在无线通信中的一系列研究成果, 包括信息超表面作为无线中继时的基本信道建模与其所能实现的信道改善, 以及基于信息超表面实现简化无线通信系统和基于信息超表面实现新型无线通信系统。

1 基于信息超表面的无线中继

基于信息超表面的无线中继近年来受到学术界和工业界的广泛关注。有别于在收发机进行设计工作的传统无线通信, 信息超表面的引进使得通信系统的设计增加了另一可控的实体——信道。合理且准确的信道模型是无线通信系统研究的理论基础。因此, 该节首先介绍了信息超表面无线中继在信道模型建立方面的一系列研究成果, 包括信息超表面辅助链路的自由空间路径损耗, 信息超表面的反射相移特性以及单元互耦现象。为体现信息超表面在信道调控方面的作用, 该节还将介绍现有研究工作如何通过设计信息超表面来改善、定制电磁传播环境。

1.1 信道建模

1.1.1 自由空间路径损耗

尽管信息超表面的设计在电磁领域已进行了广泛的研究, 其在通信领域的分析尚处于初始阶段。作为无线中继, 信息超表面为发射机和接收机之间的信道额外提供了一条可控的反射链路。鉴于信息超表面将此反射链路分成距离为 d_1 的发射机至信息超表

面子链路以及距离为 d_2 的接收机至信息超表面子链路, 信息超表面提供的反射链路的自由空间路径损耗与 d_1 和 d_2 的关系亟待澄清。当前关于信息超表面自由空间路径损耗的讨论主要在于此损耗是与 $(d_1 + d_2)^2$ 成正比, 亦或与 $(d_1 d_2)^2$ 成正比。

在发射机和接收机之间同时存在视距传播路径和信息超表面反射路径场景中, 参考文献 [36] 研究通过设计最优的信息超表面单元反射相位, 使得接收机接收到的信号能量最大化。假设地面铺满足够大的信息超表面, 该最优反射相位使得自由空间路径损耗与 $(d_1 + d_2)^2$ 成正比。参考文献 [37] 使用物理光学原理对信息超表面的自由空间路径损耗进行研究分析。理论推导结果表明, 当远场源发射的电磁波经由信息超表面反射至同样处于远场的接收机时, 即使入射波是一个平面波, 反射信号也会呈现一个窄波束的状态, 且波束宽度与信息超表面的面积尺寸呈反比。更重要的是, 由于发射机与接收机均处于信息超表面的远场, 自由空间路径损耗与 $(d_1 d_2)^2$ 成正比。因此, 参考文献 [37] 认为自由空间路径损耗与 $(d_1 + d_2)^2$ 成正比不具有通用性。若要使该关系成立, 须设计信息超表面用于镜像反射电磁波, 并使信息超表面的面积趋于无穷, 或使之处于发射机和接收机的近场。考虑信息超表面对电磁波的散射效应, 参考文献 [38] 提出了一个简单且严格的路损模型, 表明路损与距离乘积成正比。参考文献 [38] 所提出的模型采用了普适的单元辐射方向图, 因此适用于各种不同单元设计的信息超表面。在太赫兹频段, 参考文献 [39] 提供了一个低复杂度的路径损耗模型。不同于已有的研究工作, 该模型不仅揭示了路损与距离乘积的关系, 还考虑了太赫兹传播媒介特性的影响, 例如分子吸收损耗。上述工作研究的对象均为反射式信息超表面, 而在实际应用中, 透射式信息超表面也具有广泛的应用前景。针对

能够工作在反射和透射状态的信息超表面, 如图 1(a)、(b) 所示, 参考文献 [40] 等基于格林定理的矢量推广形式, 提出了一个基于物理的自由空间路径损耗解析表征模型。该模型表明, 经由信息超表面反射或透射的链路路径损耗可以用一个可计算的积分来表示, 该积分取决于传输距离、无线电磁波的极化、信息超表面的大小和所需的表面变换。

关于信息超表面路径损耗的研究已引起了众多研究者的关注, 然而大部分研究工作局限于理论分析和建模, 缺乏实际的信道测量验证。为了获得准确且符合实际通信系统的路径损耗模型, 参考文献 [41-42] 基于信息超表面的物理和电磁特性, 提出了信息超表面辅助的自由空间路径损耗通用理论模型, 并在两个典型场景中进一步推导特例模型与 d_1 和 d_2 的关系, 同时进行相应的数值仿真和实验测量验证。

参考文献 [41-42] 考虑了如图 1(c) 所示的信息超表面辅助的无线通信系统, 假设发射机与接收机之间的直达链路被障碍物完全阻挡, 收发机仅能依靠信息超表面提供的反射路径建立通信链路。参考文献 [41-42] 将信息超表面置于直角坐标系的 x - o - y 平面上, 并使信息超表面的几何中心与直角坐标系的原点重合。图 1(c) 所示的信息超表面由 N 行 M 列规则排布的电磁响应可重构的单元组成。每个电磁单元沿 y 轴方向的长度为 d_y , 沿 x 轴方向的长度为 d_x , 其大小一般为亚波长尺度, 即二分之一波长至十分之一波长。发射机到直角坐标原点的距离, 接收机到直角坐标原点的距离, 直角坐标原点到发射机的仰角和方位角, 直角坐标原点到接收机的仰角和方位角分别用 d_1 , d_2 , θ_t , ϕ_t , θ_r 和 ϕ_r 来表示。参考文献 [41-42] 的研究结果显示, 当位于 (x_t, y_t, z_t) 的发射机发射波长为 λ 的信号经信息超表面的反射被位于 (x_r, y_r, z_r) 的接收机所接收, 自由空间路径损耗通用模型可表示为:

$$PL_{general} = \frac{16\pi^2}{G_t G_r (d_x d_y)^2 \left| \sum_{m=1-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=1-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \frac{\sqrt{F_{n,m}^{combine}} \Gamma_{n,m}}{r_{n,m}^t r_{n,m}^r} e^{-j2\pi(r_{n,m}^t + r_{n,m}^r) / \lambda} \right|^2} \quad (1)$$

式中: $F_{n,m}^{combine}$ 为发射天线、信息超表面、接收天线的联合归一化功率辐射方向图, 为角度相关的因子。通过自由空间路径损耗通用模型, 参考文献 [41-42] 揭示了信息超表面反射路径的自由空间路径损耗与发射

/接收天线的增益以及电磁单元大小的平方成反比。此外, 路径损耗还与发射/接收天线以及电磁单元的联合归一化功率方向图、电磁单元的数量、电磁单元的反射系数设计以及发射机/接收机与各电磁单元之

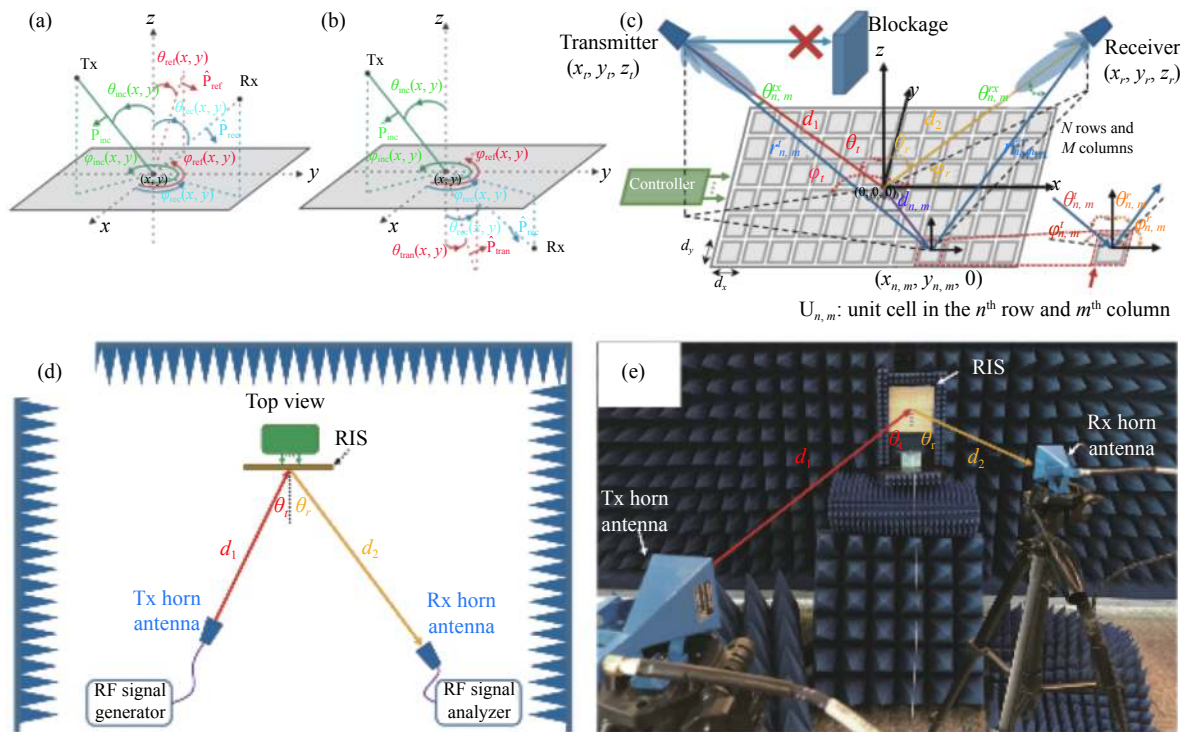


图 1 具备反射和透射功能的信息超表面路径损耗分析^[40]: (a) 发射机和接收机在信息超表面的同一侧; (b) 发射机和接收机在信息超表面的两侧; (c) 信息超表面辅助的无线通信系统^[41-42]; 用于测量不同 d_1 , d_2 , θ_t , 和 θ_r 配置下自由空间路径损耗的测量系统^[41-42]; (d) 原理图; (e) 实测照片
Fig.1 Pathloss analysis for reflection and transmission RIS^[40]: (a) Tx and Rx are on the same side of the RIS; (b) Tx and Rx are on opposite sides of the RIS; (c) RIS-assisted wireless communication system^[41-42]; Free-space path loss measurement system for measuring the amount of power reflected from the RIS for different configurations of d_1 , d_2 , θ_t and θ_r ^[41-42]: (d) Diagram; (e) Photograph

间的距离有关。为更清晰地展示路损模型与传播距离的关系, 参考文献 [41-42] 针对两个信息超表面典型应用场景进行讨论, 以便得到典型场景下自由空间路径损耗的直观见解。

参考文献 [41-42] 讨论的两个典型信息超表面应用场景为: 辅助波束成形以及辅助信号广播。在信息超表面辅助波束成形场景中, 将配置信息超表面单元的反系数, 使得反射信号在特定用户处相干叠加, 以获得最大的接收功率。而在信息超表面辅助信号广播场景中, 将配置信息超表面单元的反系数, 使得反射信号均匀覆盖特定区域内的所有用户, 以获得公平的服务质量。

在远场辅助波束成形场景下, 参考文献 [41] 给出的自由空间路径损耗模型为:

$$PL_{far\ field}^{beam} = \frac{16\pi^2(d_1 d_2)^2}{G_t G_r (MN d_x d_y)^2 F(\theta_t, \varphi_t) F(\theta_r, \varphi_r) A^2} \quad (2)$$

与通用模型相比, 信息超表面远场辅助波束成形场景下的路损更加直观, 揭示了此场景中路径损耗与

$(d_1 d_2)^2$ 成正比。

在近场辅助信号广播场景下, 参考文献 [41-42] 给出的自由空间路径损耗模型为:

$$PL_{near\ field}^{broadcast} = \frac{16\pi^2(d_1 + d_2)^2}{G_t G_r \lambda^2 A^2} \quad (3)$$

与通用模型相比, 信息超表面近场辅助信号广播场景下的路损模型揭示了该场景路径损耗与 $(d_1 + d_2)^2$ 成正比。

通过以上两个特定场景的讨论, 参考文献 [41-42] 揭示了信息超表面所提供的辅助链路的路径损耗与其具体应用场景有关。根据不同的应用场景, 该路损可与 $(d_1 d_2)^2$ 成正比, 也可与 $(d_1 + d_2)^2$ 成正比。为验证这一结论, 参考文献 [41-42] 进一步开展了实际路损测量工作, 搭建了如图 1(d)、(e) 的测量系统。通过改变系统中的 d_1 , d_2 , θ_t , 和 θ_r 对路损进行测量, 不同频段和不同场景下的实测数据验证了信息超表面远场波束成形场景下, 路径损耗与两段传输距离乘积平方成正比, 在信息超表面近场广播场景下, 路径损耗与两

段距离和的平方成正比。

1.1.2 电磁幅相特性

当前针对基于信息超表面的无线中继系统研究大多将信息超表面在通信系统中的作用建模成幅度不变或者幅相独立可调的复对角矩阵。然而在实际设计过程中,硬件不理想因素使信息超表面单元的电磁反射幅相特性呈现复杂的特性。

从信息超表面单元的等效传输线模型出发,参考

文献 [43] 提出了一种幅相依赖的反射系数模型。常见印刷电路板构成的信息超表面单元包括底层的金属底板,中介质层,顶层金属贴片及可调半导体器件,可由图 2(a) 所示等效传输线模型表示。发射电磁信号的接入点作为源,通过被视为一段传输线的自由空间与信息超表面单元构成完整的回路。在等效传输线模型中,信息超表面单元可建模成并联的谐振电路。

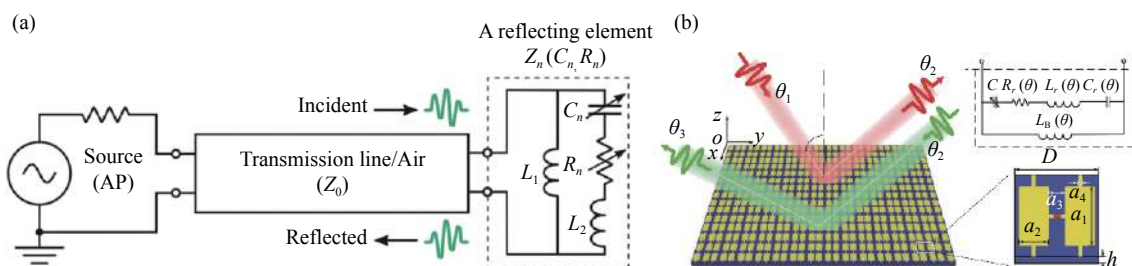


图 2 (a) 信息超表面单元的等效传输线模型^[43]; (b) 信息超表面单元的角度依赖相移器模型^[44]

Fig.2 (a) Equivalent transmission line model for the unit cell of the RIS^[43]; (b) Angle-dependent phase shifter model for the unit cell of the RIS^[44]

如图 2(a) 所示,第 n 个信息超表面单元对应的并联谐振电路的阻抗可表示为:

$$Z_n(C_n, R_n) = \frac{j\omega L_1 \left(j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_n} + R_n \right)}{j\omega L_1 + \left(j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_n} + R_n \right)} \quad (4)$$

式中: L_1, L_2, C_n, R_n 以及 ω 分别表示信息超表面单元底层电感,顶层电感,可调半导体器件电容,可调半导体器件电阻以及入射信号的角频率。因此,在传输线模型下,信息超表面单元的反射系数可以表示为:

$$\nu_n = \frac{Z_n(C_n, R_n) - Z_0}{Z_n(C_n, R_n) + Z_0} \quad (5)$$

式中: Z_0 为自由空间阻抗。由此可见,信息超表面单元的反射系数受控于可调半导体器件的电容和电阻。因此,该反射系数的幅度和相位是互相影响,如无特殊设计,则无法实现幅度不变或者幅相独立可调。

尽管参考文献 [43] 等提出的反射系数模型揭示了信息超表面单元反射系数受控于可调半导体器件的电容和电阻,且幅度和相位具有相互依赖的关系,但该模型忽视了实际通信场景中电磁波传播特性对反射系数的影响。作为具有二维平面结构的信息超表面,其对电磁波的反射特性很大程度上取决于单元几何结构的设计。当电磁波从不同角度入射至信息超表面时,信息超表面单元在电磁波垂直面上的几何

结构投影将发生变化,从而影响反射特性。考虑到实际通信场景中,入射至信息超表面的电磁波将来自四面八方,参考文献 [44] 中提出了一种角度依赖的相移器模型。如图 2(b) 所示,该模型中,信息超表面单元几何结构在传输线模型所体现的等效电容、电感以及电阻,均为电磁波入射角 θ 的函数。在实际通信场景中,采用角度依赖相移器模型能够更好地反映信息超表面对电磁波的操纵能力,同时也对基于信息超表面无线中继系统的反射系数优化提出一个切实而有具有挑战的难题。

1.1.3 互耦效应

硬件不理想特性不仅使信息超表面单元呈现复杂的电磁响应,更引发了单元与单元之间的互耦效应。在信息超表面单元互耦研究工作中,参考文献 [45] 提出了一个物理和电磁兼容的通信模型,用于分析和优化信息超表面无线中继系统。图 3 为参考文献 [45] 提出的模型的原理图,信息超表面由 $N_{\text{ris}} = M \times N$ 个单元组成,发射机和接收机分别配备 N_t 和 N_r 根天线单元。基于辐射元件(收发机天线,信息超表面单元)之间的互阻抗,参考文献 [45] 中建立的信息超表面无线中继信道模型具有四个主要的特点:(1) 端到端:该模型表述的是收发机之间的等效信道,体现了多输入多输出 (Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO) 通信系统

中发射机天线端口馈电电压 V_{T_i} ($i = 1, 2, \dots, N_t$) 与接收机天线端口测量电压 V_{L_j} ($j = 1, 2, \dots, N_r$) 的一一对应关系; (2) 电磁兼容: 该模型解释了电磁场在收发机以及信息超表面上的产生与传播过程; (3) 互耦感知: 该模型解释了信息超表面亚波长尺寸单元之间的电磁耦合现象; (4) 单元感知: 该模型解释了信息超表面单元对电磁波的反射幅度和反射相位之间的纠缠现象。

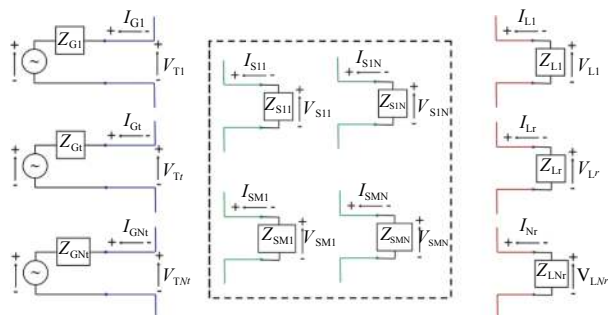


图 3 端到端互耦感知通信模型^[45]

Fig.3 End-to-end mutual-coupling-aware communication model^[45]

基于参考文献 [45] 中提出的包含互耦效应的信道模型, 参考文献 [46] 研究了单输入单输出 (Single-Input-Single-Output, SISO) 通信系统的信息超表面可调阻抗优化问题, 旨在最大化收发机的端到端信噪比。针对无互耦效应的信息超表面参考文献 [46] 得出了信息超表面最优可调阻抗的闭式表达, 并内在解释了信息超表面幅度响应和相位响应的相互作用。参考文献 [46] 通过数值仿真发现, 当信息超表面单元间距小于半波长, 互耦效应对端到端信噪比的影响尤为明显。这种情况下, 有针对性地根据信息超表面单元互耦效应优化可调阻抗, 能够提高系统端到端的信噪比。

参考文献 [46] 针对互耦效应进行的信息超表面可变阻抗优化设计仅适用于单天线收发机与单个信息超表面组成的无线中继系统, 缺乏普适性。对于更具一般性的多信息超表面辅助的多用户 MIMO 通信系统, 参考文献 [47] 以最大化用户和速率为目标, 提出了一个可证明收敛的优化算法来设计每个信息超表面的可调阻抗。

参考文献 [48] 也对信息超表面单元间互耦进行了研究。参考文献 [48] 利用严格的散射参数网络分析建立的通信模型与参考文献 [45] 所提的模型具有四个不同之处: (1) 与参考文献 [45] 中基于阻抗参数

提出的模型相比, 参考文献 [48] 发现用反射系数和散射参数来解释信息超表面的反射机理更为自然; (2) 参考文献 [48] 所建立的通信模型包含了收发机和信息超表面的阻抗不匹配因素以及互耦效应, 较参考文献 [45] 所提模型更为通用; (3) 参考文献 [48] 等解释了信息超表面相移以及恒模约束的物理意义; (4) 参考文献 [48] 不仅研究了常见单连接信息超表面, 更进一步提出了全连接结构以及组连接结构。

1.2 信道改善

自香农定义了通信信道的容量以来, 通信行业一直致力于改进通信系统以期不断提高、不断逼近香农极限。以往对通信系统的设计主要体现在收发机上, 而收发机之间的传播信道通常被视为无法主动改变仅能被动适应的不可控外生实体。根据固有传播信道设计的通信系统, 往往处于被动的困境, 无法发挥其最大潜力。例如在强视距传播的毫米波通信系统中, 不论天线个数如何增长, 处于各自远场的收发机之间的信道矩阵都将存在秩亏的现象, 无法获得多天线的通信系统的空间复用增益。信息超表面的出现, 有望打破信道不可控这一铁律。

在基于信息超表面的无线中继系统中, 信息超表面作为收发机之间传播信道中一个可控的电磁实体, 通过改变其对电磁波的响应, 能够实现对信道的操纵与改善。已有研究工作^[49-50]显示, 通过在信道中部署多个信息超表面, 信道的秩能够得到一定程度的提升。参考文献 [51] 使用基于梯度的优化方法设计信息超表面的反射系数, 以最大化包含信息超表面的信道的有效秩及其最小奇异值。在实验应用方面, 参考文献 [52] 将包含 65 个单元的信息超表面部署于如图 4(a) 所示的 $1.45 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 混沌铝腔中, 用于提升两个最多配备 8 根天线的收发机的传输速率。为了提升 $N \times N$ MIMO 信道矩阵的有效秩, 参考文献 [52] 采用顺序迭代优化算法设计 65 个信息超表面单元的反射系数。在每次迭代优化后, 测量信道矩阵并计算信道矩阵的有效秩, 若获得更高的信道有效秩, 则更新信息超表面的反射系数。图 4(b) 的实验测量结果表明对于不同的天线数 N , 优化过的信息超表面都能使系统获得满秩的信道, 降低了不同子信道的串扰。

参考文献 [49-52] 虽然从仿真、优化以及实测的角度分别证明了信息超表面能够用于改善信道的秩, 但从理论上揭示信息超表面反射系数与信道秩的关

系的工作仍然比较少。参考文献 [53] 中提出了一种信道定制的方法。如图 4(c) 所示, 在强视距传播的毫米波混合天线架构系统中, 收发机大规模天线阵列所产生的强方向性波束和具有稀疏特性的毫米波信道将使得收发机之间的信道仅存在一条传播链路。若无信息超表面的引入, 信道的秩将骤降至 1, 无法实现

多数据流传输。为解决信道秩亏的问题, 该研究工作引入了分布式信息超表面, 通过信息超表面的位置部署以及反射系数设计, 实现信道秩的任意定制。该研究工作得出了信息超表面反射系数与信道奇异值的闭式表达, 因此能够通过调整信息超表面的反射系数定制截断条件数最小, 即各个子信道均匀的传播环境。

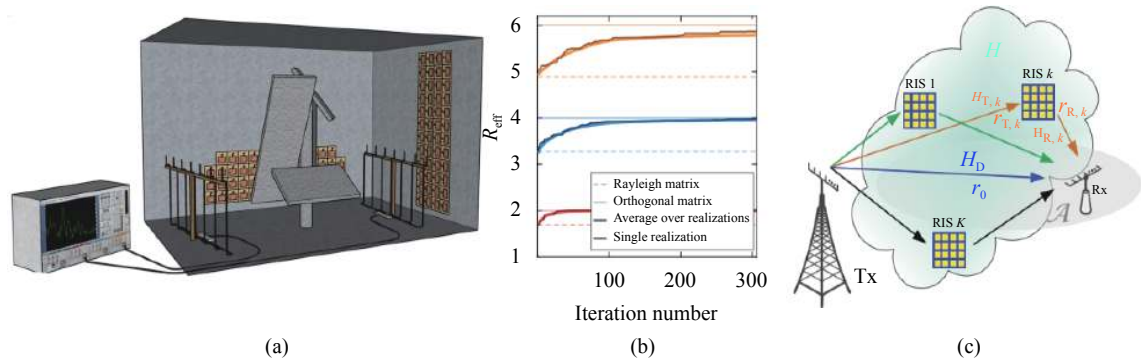


图 4 (a) 信息超表面覆盖的铝腔实验装置, 用于增强 LoS $N \times N$ MIMO 无线通信链路在 2.47 GHz WiFi 频率下的多径散射^[52]; (b) LoS $N \times N$ MIMO(红线表示 $N = 2$, 蓝线表示 $N = 4$, 橙线表示 $N = 6$) 的有效秩随着算法迭代步骤的演进。图中包含瑞利衰落信道和完美正交信道作为比较基准^[52]; (c) 分布式信息超表面辅助的强视距毫米波通信系统^[53]

Fig.4 (a) The aluminium cavity experimental setup incorporating RIS coated on the wall in order to enrich multipath scattering in a LoS $N \times N$ MIMO wireless communication link at the WiFi frequency 2.47 GHz^[52]; (b) The evolution of the effective rank R_{eff} of the LoS $N \times N$ channel matrix (red for $N = 2$, blue for $N = 4$, and orange for $N = 6$) over the number of algorithmic steps. Benchmarks for Rayleigh fading and perfect channel orthogonality are also included^[52]; (c) Distributed RISs-assisted strong LoS mmWave communication systems^[53]

2 基于信息超表面的简化发射机架构与新型无线通信系统

信息超表面展现出的对电磁波强大的操纵能力为搭建简化的发射机架构和新型无线通信系统提供了可能性, 这种简化的发射机架构和新型系统采用信息超表面替代传统的射频 (RF) 元件, 具有效率高、成本低、功耗低、易于组装等优点。该节介绍了信息超表面的信息论和一些具有代表性的发射机以及无线通信系统原型, 以展示信息超表面在未来无线通信技术中的潜力, 其中包括超表面信息论、二进制频移键控 (binary frequency shift keying, BFSK) 发射机^[54]、相移键控 (phase shift keying, PSK) 发射机^[55-56]、正交振幅调制 (QAM) 发射机^[57-58]、直接辐射无线通信系统^[59]、多通道直接通信系统^[60-61]和空/频分复用系统^[62]等内容。

2.1 信息超表面中的信息论

1945 年香农为了准确评估通信系统的信息量, 创

新性地将熵引入信息论, 并提出了信息熵的概念。香农信息论指出, 信息熵被用来衡量事件不确定性的 大小, 并且用熵的减少来定义信息量。为了从信息角度表征并度量信息超表面所生成远场辐射模式的特征, 东南大学崔铁军教授团队首次将信息超表面与香农信息熵相结合, 提出了基于信息超表面的信息熵理论^[63]。在参考文献 [63] 中计算了不同编码图案的信息超表面所对应的空间几何熵以及其在电磁波照射下生成的远场散射方向图的物理熵, 见图 5(a)、(b)。计算和仿真结果显示 (图 5(c)), 信息超表面的空间几何熵与其远场物理熵存在近似正比关系, 及超表面的编码图案信息量越多, 对应其远程方向图的信息就越多。该结论为基于信息超表面的无线通信的应用打下理论基础。笔者所在课题组还得到了信息超表面的表面信息 I_1 与其所生成的远场辐射方向图的 I_2 之间的信息制约关系^[64], 即 $I_1 + I_2 \leq \ln\left(\frac{4\pi \cdot S}{e^2 \lambda^2}\right)$, 其中 S 为信息超表面的物理孔径, λ 为电磁波的波长 (图 5(d))。利用这一信息制约关系可以得出确定孔径面积下信

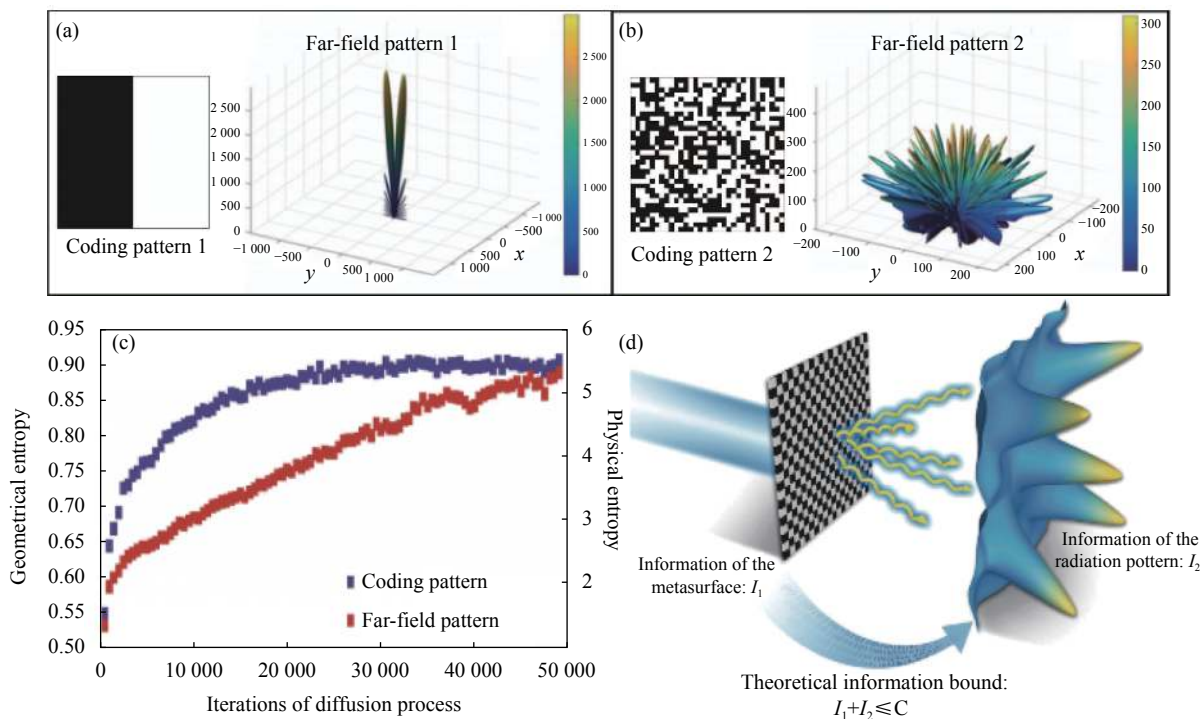


图 5 不同编码图案的信息超表面及其远场模式^[63]。(a) 对称编码、(b) 随机编码和 (c) 不同编码图案的几何和物理熵之间的关系；(d) 信息超表面携带的信息与超表面辐射图信息之间的关系示意图^[64]

Fig.5 Non-periodic coding metasurfaces and their far-field patterns^[63]. (a) Symmetric coding; (b) random coding, and (c) the relationship between the geometrical and physical entropies; (d) Schematic of information relation between the metasurface and its radiation pattern^[64]

息超表面所能实现的正交远场方向图的数量上限，还可以为信息超表面的逆向设计提供理论指导。这一结论有望为基于信息超表面的信息相关应用，如计算成像，隐身技术和无线通信等提供理论指导。

2.2 基于信息超表面的简化发射机架构

现代通信系统的工作原理是先将数字信息进行数模转换后变成中频模拟信号，再进行调制后加载到载波，最后经过放大和微波射频链路后由天线发射出去。而基于信息超表面的发射机架构大大简化了这一过程。由于入射到信息超表面上的电磁波(或其谐波)的幅度、相位等信息会直接被携带信息的超表面改变，因此这一过程可看成是信息被调制的过程，且具有很高的效率。

2.2.1 BFSK 发射机

参考文献 [54] 提出了第一个基于信息超表面的 BFSK 调制方案的简化发射机架构。参考文献 [54] 引入时间编码概念，利用两组在时间上有一定长度的编码序列来分别产生-1 阶谐波和+1 阶谐波，并映射到二进制的数字信号“0”和“1”。该文用两组 2-bit 编码

序列来分别产生-1 阶谐波和+1 阶谐波，并映射到二进制数字信号“0”和“1”。如图 6(a)、(b) 所示，该文在微波暗室中搭建了一个概念验证原型系统，并实现了实时数据传输。实验中需要在超表面放置喇叭天线来提供载波，将信息编译成二进制数据流，并进一步映射到超表面的控制信号中，此时用 USRP-2943 R 作为接收机就可以对已调制的反射波进行接收并解调。图 6(c) 为系统发送二进制数字“0”时接收端接收到的频谱。由于-1 阶谐波(-312.5 kHz) 的功率比+1 阶谐波(+312.5 kHz) 高出近 20 dB，接收端可以很容易地判断发送的数字信号为“0”。该系统还实现了实时图像传输，数据速率为 78.125 kbps。图 6(b) 展示了在接收端成功恢复了映射到超表面上的图像信息，其质量与原图完全一致。为了定量地评估该无线通信系统的性能，参考文献 [54] 测量了在不同通信距离、夹角以及馈源天线发射功率下无线通信链路的误比特率(BER)，如图 6(d) 所示，结果显示距离越小、夹角越小、发射功率越大，误比特率就越小，这点与传统通信系统发射机结果是类似的。该原型首次验证了

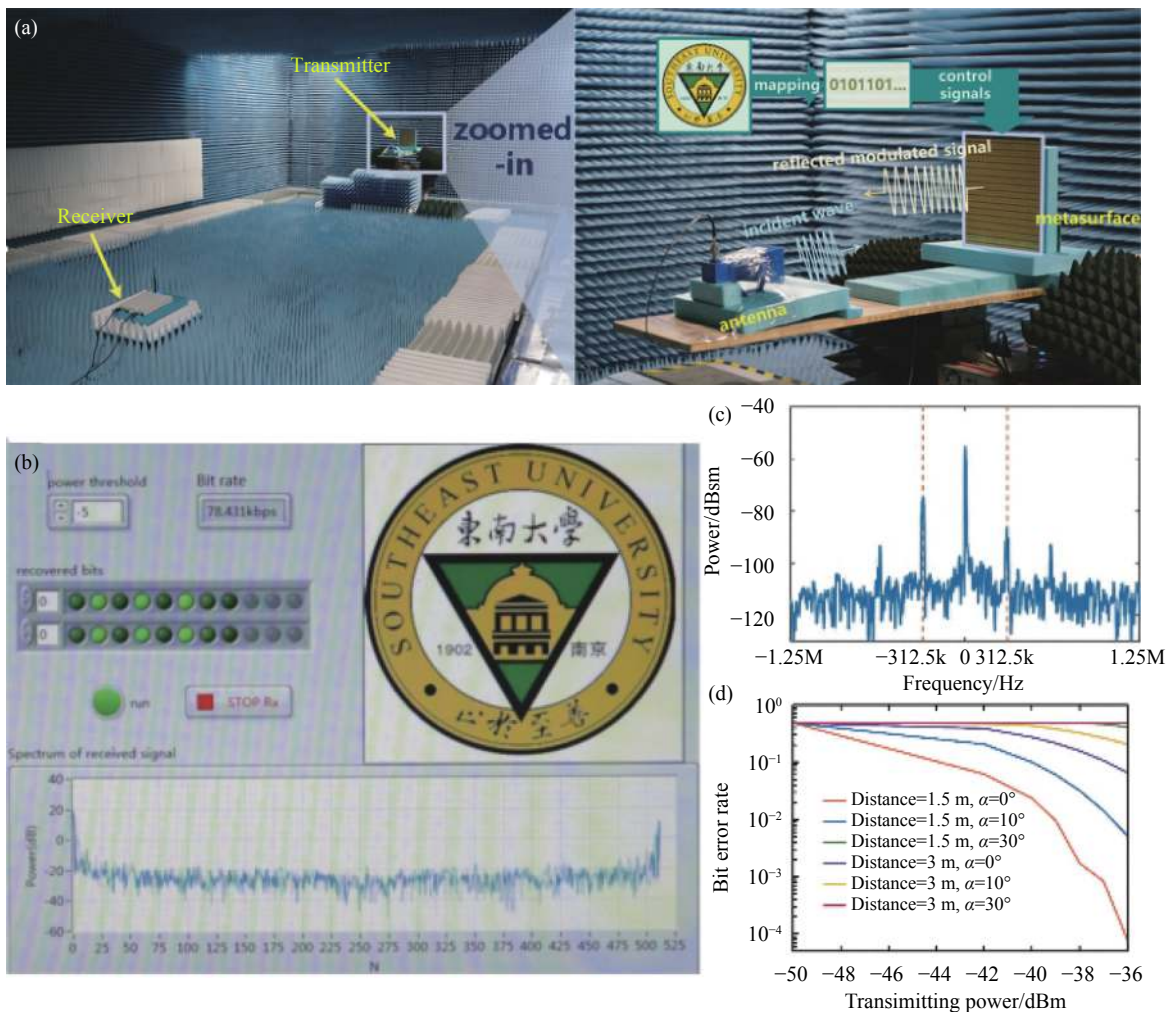


图 6 (a) 基于信息超表面的 BFSK 调制方案的简化无线通信系统及发射机细节 (右侧)^[54]; (b) BFSK 调制方案下接收到的图片数据; (c) 接收到的实时信号的频谱; (d) 该系统在不同通信距离、夹角下信息传输误比特率与馈源天线发射功率关系图

Fig.6 (a) Experimental scenario of the BFSK wireless communication system based on information metasurface with transmission process described on the right^[54]; (b) The received messages by the BFSK wireless communication system; (c) The instantaneous experimental results for the receiving spectrum.; (d) The relation diagram between the bit error rate and the transmitting power of the feed antenna at different communication distances and incident angles

构建基于信息超表面的无线通信系统的可行性,对后续研究有重要指导意义。

2.2.2 PSK 发射机

与 BFSK 调制方案不同, PSK 调制方案可以通过直接改变载波相位来实现信息传输。由于 PSK 的映射关系与信息超表面的相位编码方案非常相似,即利用二进制数字“0”和“1”来代表超表面上的相位“0”和“ π ”,因此相位编码的信息超表面非常适合用做 PSK 调制方案的无线通信发射机。相比于前述的 BFSK 调制方案, PSK 不需要一定长度的编码序列来表示每个消息符号, PSK 只需要一个相位状态即可传

输一位数字信号,相较于 BFSK 调制方案具有更高的调制效率和传输速率。如图 7(a)所示,参考文献 [55]提出了一种实现正交相移键控(QPSK)调制的无线通信发射机,并在实验中达到了 1.6 Mbps 的高传输速率。由于可以引入传统的无线通信技术,发射机的可靠性和误比特率都可以得到很大的提高。作为一种需要相干解调才能恢复数字信息的调制方案,星座图被用来进行性能评估。一般来说,理想的 QPSK 调制的星座图应该包含四个具有相同幅度和不同相位的散点分别表示 QPSK 调制的一个数字符号,即“00”“01”“10”“11”。从图 7(b)可以发现得到的星座图并

不是很标准,而是出现了四个散点簇,这是由于相位编码信息超表面的四个相位状态的幅度不均匀造成的。此外还可以看到,低数据速率下的分散簇比高数据速率下的分散簇更集中,这是由于控制信号在一个符号持续时间内的失真造成的。在 QPSK 调制方案

的基础上,参考文献 [56] 使用升级后的控制平台和超表面,进一步实现了 8 移相键控 (8 PSK) 调制方案的发射机 (图 7(c)),并在保证信噪比的情况下将信息传输比特速率进一步提高到了 6.144 Mbps 的数据速率 (图 7(d))。

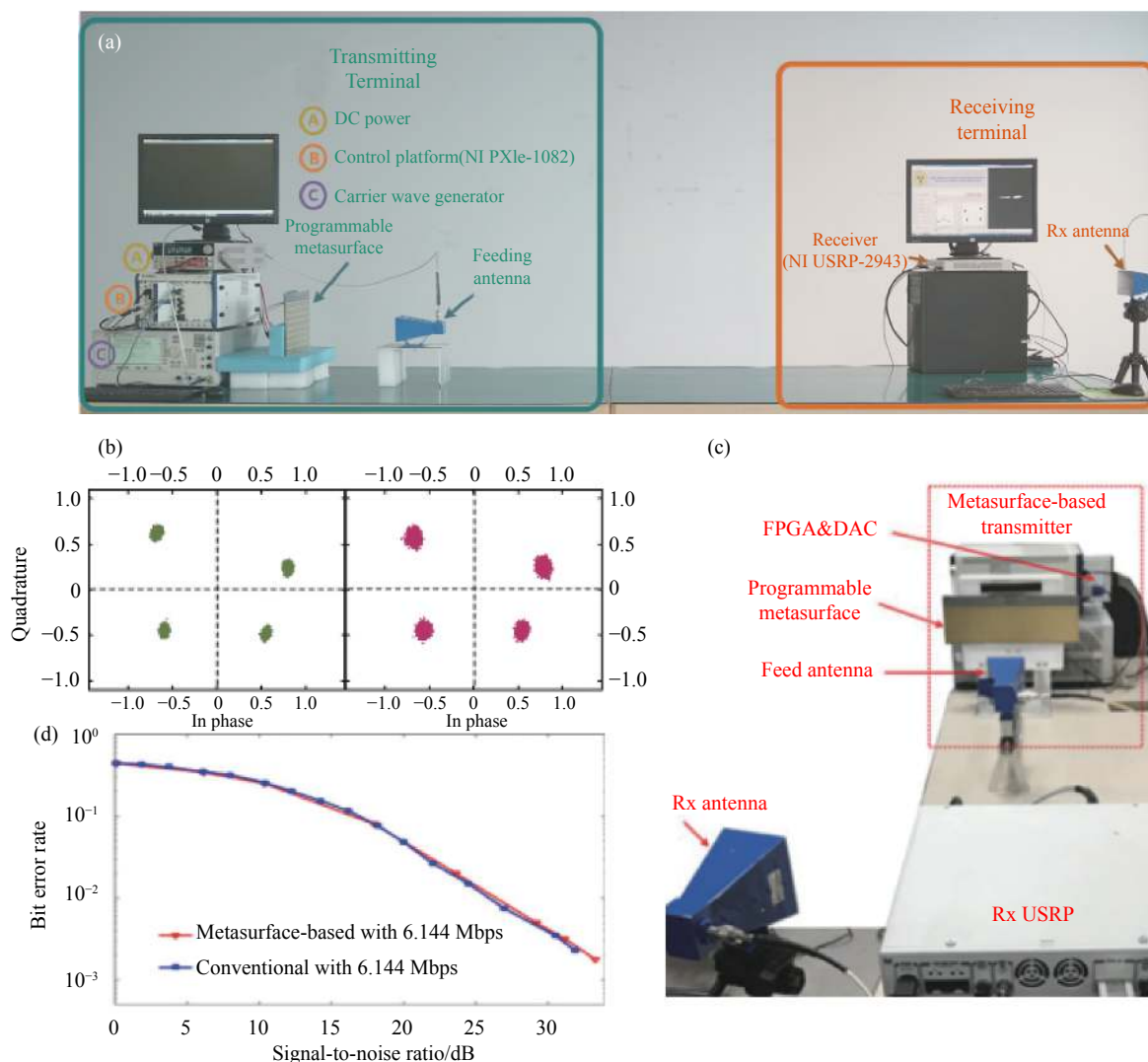


图 7 (a) 基于信息超表面的 QPSK 调制方案无线通信系统的示意图^[55]; (b) QPSK 调制方案下不同数据速率下接收的星座图; (c) 基于信息超表面的 8 PSK 调制方案无线通信系统的实验场景图^[56]; (d) 8PSK 发射机和传统的基于 SDR 的发射机的接收端信噪比 (SNR) 和相应的误码率 (BER)

Fig.7 (a) Photograph of the QPSK wireless communication system based on the information metasurface^[55]; (b) The dependence of the measured constellation diagram of the QPSK wireless communication system on the message transmission rate at receiving terminal; (c) Photograph of the 8 PSK wireless communication system based on the information metasurface^[56]; (d) The signal-to-noise ratio (SNR) and the corresponding BER at the receiver of the 8 PSK transmitter and the conventional SDR-based transmitter

2.2.3 QAM 发射机

相较于 PSK 调制方案, QAM 调制方案更加高级和复杂。QAM 调制需要两个相位差为 $\pi/2$ 的独立幅

度调制信号,因此搭建基于信息超表面的 QAM 无线通信系统需要一种能够联合调制载波幅度和相位的信息超表面作为硬件基础,这对于超表面单元的设计

提出了更高的要求。为了解决这个问题,参考文献 [65] 引入循环时延对谐波的幅度和相位进行独立精准的调控并综合出任意标准理论分布的星座图,从而实现高阶调制。该方法只需要相位可调的超表面就可以实现,巧妙地避开了 QAM 调制方案需要设计幅度和相位独立调控单元的要求,大大降低了超表面的设计难度。参考文献 [57] 设计了 16 正交振幅调制 (16 QAM)

调制方案的概念样机,并在室内环境下进行了实验验证,在最终的测试中信息传输比特速率达到了 10 Mbps。图 8(a) 展示了参考文献 [57] 中搭建的同一个基于时间编码超表面的无线系统通过改变编码策略分别实现 QPSK、8 PSK 和 16 QAM 三种不同的调制方案而得到的星座图测量结果,星座点的分布均符合预期。

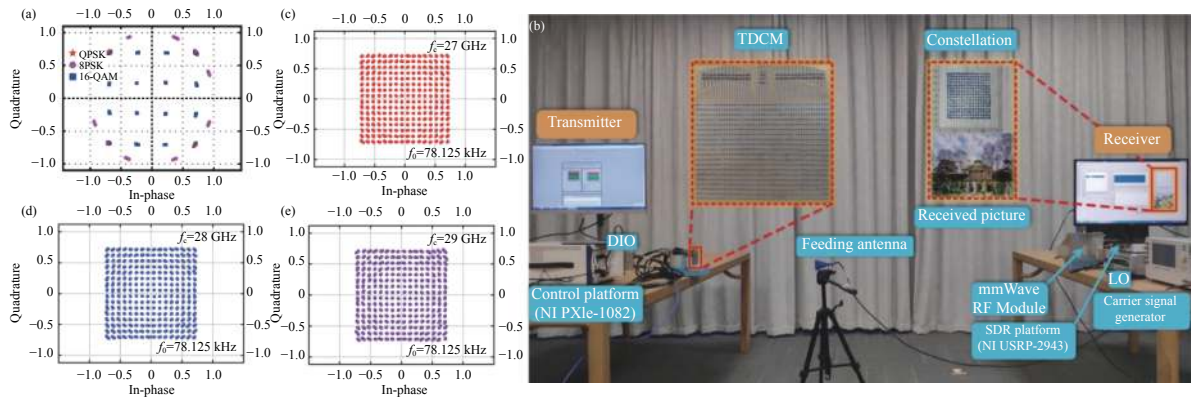


图 8 (a) 测量的 QPSK、8 PSK 和 16 QAM 的星座图^[57]; (b) 实验中搭建的基于信息超表面的 256 QAM 调制毫米波无线通信系统^[58]。不同载波下测得的 256 QAM 的星座图载频: (c) 27 GHz; (d) 28 GHz; (e) 29 GHz

Fig.8 (a) The measured constellation diagrams for QPSK, 8 PSK and 16 QAM^[57]; (b) Photograph of the mmWave 256 QAM wireless communication system based on the information metasurface^[58]. The 256 QAM constellation diagrams with a frequency interval of 78.125 kHz at (c) $f_c=27$ GHz, (d) 28 GHz, and (e) 29 GHz, respectively

最近,参考文献 [58] 提出了采用周期方波作为基本函数的相位,分别利用占空比和时延进行幅度和相位调制,从而实现了一种新的方法来精确且宽带地操纵谐波的幅度和相位。该方法的亮点在于可在宽带内实现对谐波的幅度和相位的独立调控,并在此基础上实现了基于信息超表面的 256 正交振幅调制 (256 QAM) 调制方案。图 8(b) 为实验中搭建的基于信息超表面的 256 QAM 调制毫米波无线通信系统。图 8(c)~(e) 分别给出了载频 f_c 为 27 GHz、28 GHz 和 29 GHz 时的实测星座图,它们都呈现出标准的 256 QAM 星座点分布。实验结果表明所提出的方案兼具了宽带和高阶的优势,展现了信息超表面在无线通信领域巨大的潜力。

2.3 基于信息超表面的新型无线通信系统架构

除了将信息超表面直接用于调制入射电磁波的波前,还可以利用电磁波的近场、远场信息,以及对不同频率的响应,甚至对杂散电磁波的调制能力构成新型无线通信系统。此外,基于信息超表面的新型无线

通信系统架构需要知道接收到的信号和超表面编码之间的映射关系,才能正确地恢复发送的信息,因此是很有前途的物理层秘密通信方法,在卫星对地通信、军事无线通信和室内通信等特殊场景中有可能发挥特长。

2.3.1 直接辐射无线通信系统

在前述的简化无线通信系统中,信息仅在时域上被调制,因此在超表面的辐射远场的所有方向上都携带相同的信息。MIMO 利用空间分离的发射器和接收器来增加信道容量,它的出现使得信号传输可以利用空间这个维度,而空间的信息容量比时间维度明显高得多^[66]。从理论上来说,可以通过天线远场的空间变化,在单一的时段内传输无限数量的信息,如图 9(a) 所示。信息超表面具有远场辐射方向图可动态控制特性的特性,因此可以直接用来传递信息。参考文献 [59] 提出了一种基于信息超表面的新型无线通信系统,该技术通过动态变化的信息超表面将信号直接进行调制,并在外部馈源天线的照射下辐射到自

由空间。这种新型无线通信系统可以省去现代通信系统中的许多传统模块,如混频器和 D/A 转换器,从而大大简化了无线通信系统的系统结构。图 9(b)~(e)展示了搭建的原型系统的性能,并将一张黑白图像编码后发送。在视线传播过程中,传输过程准确地进行(图 9(c)),但一旦发射器和接收器之间设置了金

属障碍物,传输过程就会中断(图 9(d))。为了使系统能够在无线信道部分阻塞的真实环境下正常工作,参考文献 [59] 还设计了一种信道优化算法,使其可自适应地找到所有可识别的场图模式,从而提高系统对信道干扰的抗干扰能力。图 9(e)展示了应用了该信道优化算法后就可以正确地恢复出发射端的图像。

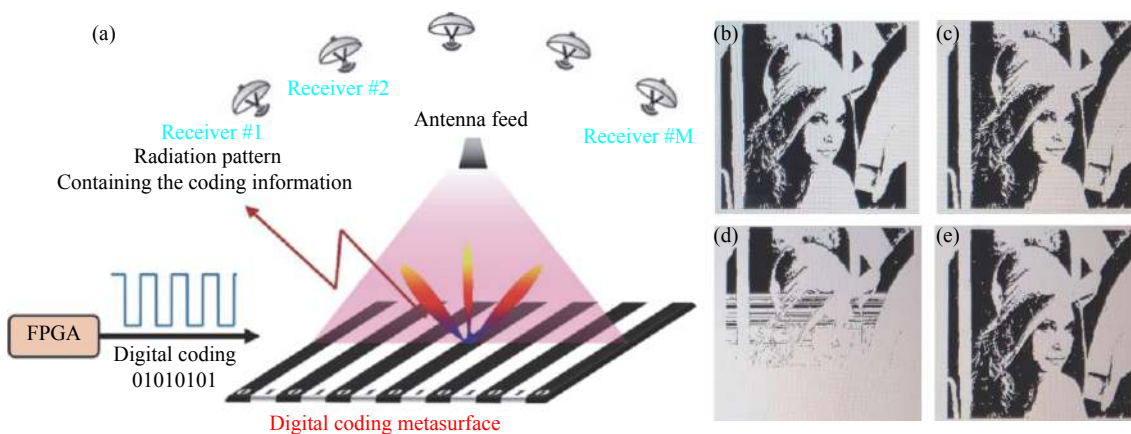


图 9 (a) 利用信息超表面的远场变化直接传输数字信息的示意图^[59]; (b) 测试原型系统的性能而发送的原始图像; (c)~(e) 三种测试场景下接收机接收的图像: (c) 无障碍物, (d) 有障碍物, (e) 有障碍物并应用信道自适应算法

Fig.9 (a) The schematic diagram of transmitting digital message directly via the farfield change of the information metasurface^[59]; (b) The original image to be transmitted for testing the performance of the prototype system; (c)-(e) The received image: (c) without barrier in the channel, (d) with barrier in the channel; (e) The received image after running the self-adaption program with barrier in the channel

2.3.2 多通道直接通信系统

多通道直接通信是一种潜在的扩大通信容量的解决方案,其重点在于综合不同的近场/远场模式,将不同通道的信息直接传输给位于不同方位的用户^[60-61]。参考文献 [60] 提出了一种基于信息超表面的多通道直接通信系统,该系统能够合成不同的近场模式来控制焦平面上相应像素的强度。处于特定位置的每个用户都可以有一个独立的通道,并通过幅度调制来接收不同的信息。实验中采用 BASK 调制方案对三个通道的信息进行独立地调制(图 10(a)), 8 种编码模式分别用来对应三个通道的每一种可能的数字信息,三个接收器分别部署在指定方位接收信息,并在各自的无线信道中解调信息。8 种编码模式对应的近场幅度分布如图 10(b) 所示,展示了其对三个方位上幅度的独立控制。

参考文献 [61] 也构建了一个原型系统用来展示信息超表面利用 2.4 GHz 商用 Wi-Fi 信号进行三通道散射无线通信的能力。如图 10(c) 所示,无线路由器

向环境发送标准的 Wi-Fi 信号,环境中一个基于信息超表面的发射机 (“Alice”)、一个标准的 Wi-Fi 用户 (“listener”) 和三个用户 (“Bob-R”、“Bob-G”和“Bob-B”)。Alice 可以调制从超表面反射的杂散 Wi-Fi 信号,并分别向三个用户发送数据流。listener 上的信号被用于噪声消除,使得可以轻易地在三个接收终端对 Wi-Fi 信号中的信息进行解调。该系统使用 ASK 调制来实现信息传输,也可以进一步实现 PSK 调制方案^[61],此时就可以在三个用户所在位置进行独立的相位调制。参考文献 [61] 通过对 8 种编码模式优化,使得每种编码图案都能将特定的数字信息分别传输到三个通道上,对应的远场幅度和相位分布图如图 10(d) 所示。三个用户上的信号在保持比较高的幅度的情况下,相位可由编码图案独立控制。图 10(e) 给出了实现 BPSK 调制方案的系统在单通道、双通道和三通道情况下的星座图测量结果,其中的星座点分布非常清晰。实验中还将一张彩色图像分解为三张单色图像,如图 10(f) 所示,分别通过三个通道进行传输,并

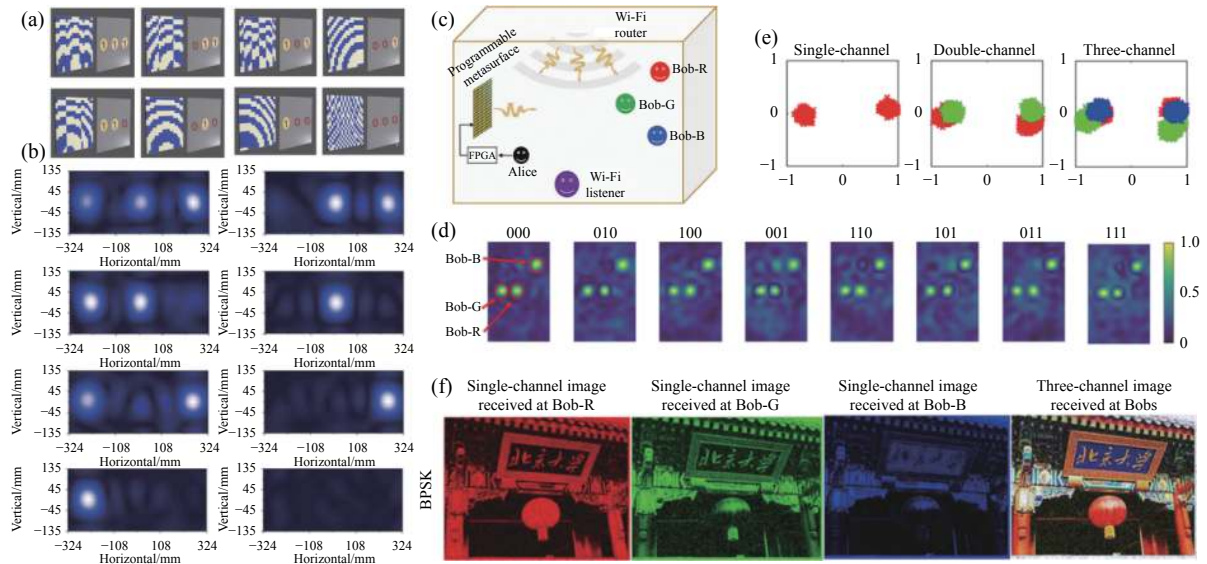


图 10 (a) 三通道直接传输的 8 种编码图案和 (b) 对应的近场振幅分布^[60]; (c) 基于超表面的散射无线通信概念说明^[61]; (d) 超表面辅助大规模后向散射无线通信中 8 种编码模式的幅度分布; (e) 分别实现单通道、双通道和三通道 BPSK 调制方案的星座图; (f) 从三个用户接收到的三张单色图像及合成的彩色图像

Fig.10 (a) The direct transmitted 8 phase codes in three channels and (b) corresponding near-field patterns^[60]; (c) Schematic of the experimental setup of the metasurface-assisted massive backscatter wireless communication^[61]; (d) Amplitude distributions of the 8 coding patterns in the metasurface-assisted massive backscatter wireless communication; (e) BPSK constellation results of single-channel, double-channel and three-channel; (f) Individual monochrome and synthesized full-color images transmitted from Alice to Bobs

将得到的三张单色图像合成后重新得到了原始的清晰的彩色图。

2.3.3 空间/频分复用系统

除了上述的几种利用空间域的复用技术,参考文献 [62] 又提出了一种新的基于信息超表面的信息编码方案,实现了空间和频率域的多路复用技术。图 11(a) 为具有直接数据传输特性的多通道系统的概念示意图,这

种空间/频率复用系统可以同时向空间不同位置的多个用户独立传递不同信息。通过优化超表面的编码可以使指定频率的主波束指向目标用户,并且可以通过改变编码来独立控制指向多个用户的功率强度。如图 11(b) 所示,实验中搭建了一个基于 2 bit 相位编码超表面的双通道直接信息传输系统,通过改变超表面的编码从而改变+1 阶谐波和-1 阶谐波在不同方位

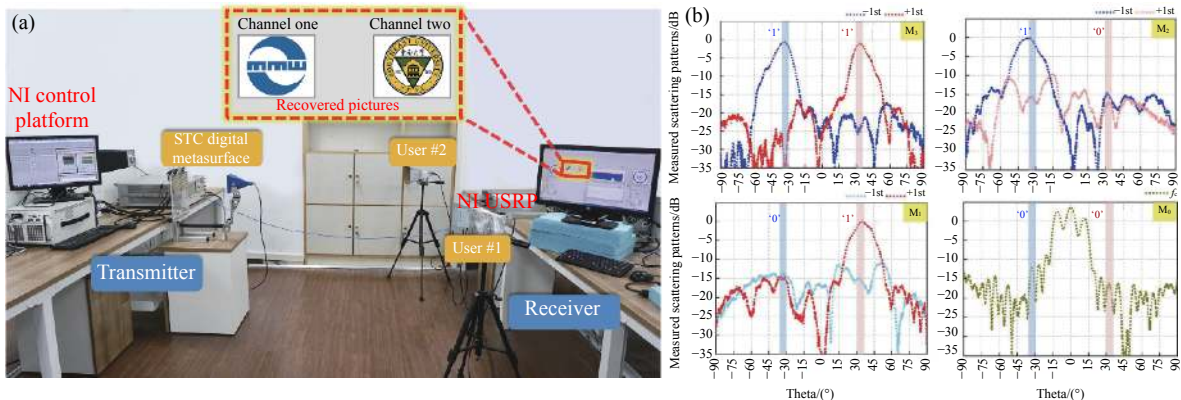


图 11 (a) 基于信息超表面的双通道无线通信系统实验照片^[62]; (b) 4 种编码图案在双通道直接信息传输系统中的辐射方向图测量结果

Fig.11 (a) Experimental scenario of the dual-channel wireless communication system based on information metasurface^[62]; (b) Measured radiation patterns of the four coding patterns for dual-channel direct information transmissions

的幅度(图 11(c))。在这种多路复用通信系统中,不同方位上的用户都有一个特定的频率来构造自己的通道,并且彼此之间的干扰很低。实验中成功地将两张不同的图片发送到不同方位上的两个用户。此外还测试了两个用户位于非对称方向和相同方向的情况,且都成功地接收到了对应的图片。

3 结 论

自 2014 年提出数字编码和可编程超材料以来,信息超材料已经逐渐发展为电磁学、信息学、人工智能、数学、材料学等多个领域的前沿交叉学科,超材料不再局限于对空间电磁波进行操控和进行简单的物理现象验证工作,而是增加了信息维度,向着无线通信应用发起挑战。从最简单的对空间电磁波的幅度、相位、极化等信息的操控到基于信息超表面的发射机的设计,再到基于信息超表面的新型无线通信系统的设计和无线电磁信道的改善甚至定制,信息超表面在近几年内正发生着快速的迭代进化。在渐进式发展遭遇瓶颈的无线通信系统中,“物美价廉”的信息超表面或许可以为下一代移动通信开辟广阔的研究空间。随着信息超表面的新现象不断被发现,新方法、新技术、新应用不断被开发,未来信息超表面在无线通信中的应用也将会朝着高速化、多功能、自动化、软件化、智能化等方向发展。除此之外,由于信息超表面对电磁波高度的可操控性,使得电磁信息调制更加精细和灵活,因此信息超表面还有望在高容量保密通信中展露头角。

参考文献:

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors, and enhanced non-linear phenomena [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, 47(11): 2075-2084.
- [2] Shelby R A. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- [3] Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(18): 3966.
- [4] Cheng Q, Cui T J, Jiang W X, et al. An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials [J]. *New Journal of Physics*, 2010, 12(6): 063006.
- [5] Liu R, Ji C, Mock J, et al. Broadband ground-plane cloak [J]. *Science*, 2009, 323(5912): 366-369.
- [6] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [7] Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens [J]. *Science*, 2005, 308(5721): 534-537.
- [8] Jiang W X, Qiu C W, Han T C, et al. Broadband all-dielectric magnifying lens for far-field high-resolution imaging [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(48): 6963-6968.
- [9] Jiang W X, Ma H F, Cheng Q, et al. Illusion media: Generating virtual objects using realizable metamaterials [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(12): 121910.
- [10] Lai Y, Jack N G, Chen H Y, et al. Illusion optics: the optical transformation of an object into another object [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 253902.
- [11] Jiang W X, Qiu C W, Han T C, et al. Creation of ghost illusions using wave dynamics in metamaterials [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(32): 4028-4034.
- [12] Chiu C N, Chang K P. A novel miniaturized-element frequency selective surface having a stable resonance [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1175-1177.
- [13] Sarabandi K, Behdad N. A frequency selective surface with miniaturized elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(5): 1239-1245.
- [14] Liu S, Chen H, Cui T J. A broadband terahertz absorber using multi-layer stacked bars [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(15): 151601.
- [15] Xiong H, Hong J S, Luo C M, et al. An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(6): 064109.
- [16] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction [J]. *Science*, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [17] Liu L X, Zhang X Q, Kenney M, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031-5036.
- [18] Gao X, Yang W L, Ma H F, et al. A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6086-6095.
- [19] Li S J, Li Y B, Zhang L, et al. Meta-microstructures: Programmable controls to scattering properties of a radiation array [J]. *Laser & Photonics Review*, 2021, 15(2): 2000449.
- [20] Chen M, Epstein A, Eleftheriades G V. Design and experimental verification of a passive Huygens' metasurface lens for gain

- enhancement of frequency-scanning slotted-waveguide antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(7): 4678-4692.
- [21] Iqbal S, Liu S, Luo J, et al. Controls of transmitted electromagnetic waves for diverse functionalities using polarization-selective dual-band 2 bit coding metasurface [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(1): 015104.
- [22] Li L L, Ruan H X, Liu C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1082.
- [23] Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital meta-materials and programmable metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3: e218.
- [24] Zhu B, Chen K, Jia N, et al. Dynamic control of electromagnetic wave propagation with the equivalent principle inspired tunable metasurface [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4971.
- [25] Yoon G, So S, Kim M, et al. Electrically tunable metasurface perfect absorber for infrared frequencies [J]. *Nano Converg*, 2017, 4(1): 36.
- [26] Park J, Kang J H, Liu X, et al. Electrically tunable Epsilon-Near-Zero (ENZ) metafilm absorbers [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15754.
- [27] Sun Y L, Zhang X G, Yu Q, et al. Infrared-controlled programmable metasurface [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(11): 883-888.
- [28] Zhang X G, Jiang W X, Jiang H L, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions [J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(3): 165-171.
- [29] Zhang X G, Yu Q, Jiang W, et al. Programmable metasurfaces: Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces [J]. *Advanced Science*, 2020, 7(11): 2070058.
- [30] Zeng X L, Gao M, Zhang L X, et al. Design of a tuneable and broadband absorber using a switchable transmissive/reflective FSS [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2018, 12(7): 1211-1215.
- [31] Ma Q, Hong Q R, Bai G D, et al. Editing arbitrarily linear polarizations using programmable metasurface [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 021003.
- [32] Cui T J, Li L L, Liu S, et al. Information Metamaterial System s [J]. *iScience*, 2020, 23(8): 101403.
- [33] Zhang Z, Dai L, Chen X, et al. Active RIS vs. passive RIS: Which will prevail in 6 G? [J]. *arXiv*, 2021: 2103.15154v3.
- [34] Huang C W, Hu S, Alexandropoulos G C, et al. Holographic MIMO surfaces for 6 G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2020, 27(5): 118-125.
- [35] Basar E. Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6 G [J]. *IEEE Transactions Communications*, 2020, 68(5): 3187-3196.
- [36] Basar E, Renzo M D, Rosny J D, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 116753-116773.
- [37] Özdogan O, Björnson E, Larsson E G. Intelligent reflecting surfaces: Physics, propagation, and pathloss modeling [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(5): 581-585.
- [38] Ellingson S W. Path loss in reconfigurable intelligent surface-enabled channels[C]//2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2021: 829-835.
- [39] Boulogeorgos A -A A, Alexiou A. Pathloss modeling of reconfigurable intelligent surface assisted THz wireless systems[C]//IEEE International Conference on Communications, 2021: 1-6.
- [40] Danufane F H, Renzo M D, Rosny J D, et al. On the path-loss of reconfigurable intelligent surfaces: An approach based on green's theorem applied to vector fields [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(8): 5573-5592.
- [41] Tang W, 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.
- [42] Tang W, Chen M Z, Chen X Y, et al. Path loss modeling and measurements for reconfigurable intelligent surfaces in the millimeter-wave frequency band [J]. *arXiv*, 2021: 2101.08607v2.
- [43] Abeywickrama S, Zhang R, Wu Q Q. Intelligent reflecting surface: Practical phase shifter model and beamforming optimization [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2020, 68(9): 5849-5863.
- [44] Chen W, Bai L, Tang W, et al. Angle-dependent phase shifter model for reconfigurable intelligent surfaces: Does the angle-reciprocity hold? [J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(9): 2060-2064.
- [45] Gradoni G, Renzo M D. 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.
- [46] Qian X, Renzo M D. Mutual coupling and unit cell aware optimization for reconfigurable intelligent surfaces [J]. *IEEE*

- Wireless Communications Letters*, 2021, 10(6): 1183-1187.
- [47] Abrardo A, Dardari D, Renzo M D, et al. MIMO Interference channels assisted by reconfigurable intelligent surfaces: Mutual coupling aware sum-rate optimization based on a mutual impedance channel model [J]. *arXiv*, 2021: 2102.07155.
- [48] Shen S, Clerckx B, Murch R. Modeling and architecture design of intelligent reflecting surfaces using scattering parameter network analysis [J]. *arXiv*, 2021: 2011.11362v2.
- [49] Yang X, Wen C-K, Jin S. MIMO detection for reconfigurable intelligent surface-assisted millimeter wave systems [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020, 38(8): 1777-1792.
- [50] Zheng B, You C, Zhang R. Double-IRS assisted multi-user MIMO: Cooperative passive beamforming design [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(7): 4513-4525.
- [51] ElMossallamy M A, zhang H, Sultan R, et al. On spatial multiplexing using reconfigurable intelligent surface [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2021, 10(2): 226-230.
- [52] Hougne P D, Fink M, Lerosey G. Optimally diverse communication channels in disordered environments with tuned randomness [J]. *Nature Electronics*, 2019, 2: 36-41.
- [53] Chen W, Wen C K, Li X, et al. Channel customization for joint Tx-RISs-Rx design in hybrid mmWave systems [J]. *arXiv*, 2021: 2109.13058.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Tang W K, Dai J Y, Chen M Z, et al. Programmable metasurface - based RF chain - free 8 PSK wireless transmitter [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(7): 417-420.
- [57] 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.
- [58] Chen M Z, Tang W K, Dai J Y, et al. Accurate and broadband manipulations of harmonic amplitudes and phases to reach 256 QAM millimeter-wave wireless communications by time-domain digital coding metasurface [J]. *National Science Review*, 2021: nwab134.
- [59] Cui T J, Liu S, Bai G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface [J]. *Research*, 2019, 2019(2): 2584509.
- [60] Wan X, Zhang Q, Chen T Y, et al. Multichannel direct transmissions of near-field information [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 1-8.
- [61] Zhao H, Shuang Y, Wei M L, et al. Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity Wi-Fi signals [J]. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 3926.
- [62] 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.
- [63] Cui T J, Liu S, Li L L. Information entropy of coding metasurface [J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(11): e16172.
- [64] Wu H T, Bai G D, Liu S, et al. Information theory of metasurfaces [J]. *National Science Review*, 2020, 7(3): 561-571.
- [65] 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.
- [66] Lu L, Li G Y, Swindlehurst A L, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges [J]. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 2014, 8(5): 742-758.