



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research

6G Requirements, Vision, and Enabling Technologies—Article

利用超表面协同调制电磁波与数字信号以实现可编程无线通信

万向^{a,*}, 肖朝昆^b, 黄鹤^b, 肖强^a, 许威^{b,*}, Yueheng Li^c, Joerg Eisenbeis^c, 王嘉伟^a, 黄梓艾^a, 程强^a, 金石^b, Thomas Zwick^c, 崔铁军^{a,*}

^a State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China

^b National Mobile Communications Research Lab, Southeast University, Nanjing 210096, China

^c Institute of Radio Frequency Engineering and Electronics (IHE), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe 76131, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 September 2020

Revised 10 January 2021

Accepted 18 February 2021

Available online 15 September 2021

关键词

雷达与通信一体化

可编程超表面

大规模多输入多输出

摘要

在当前的无线电子信息系统,数字信号和电磁辐射一般由不同的模块进行处理。本文基于可编程超表面提出了一种将数字信号调制与电磁辐射调控相融合的工作机制。可编程超表面包含大量亚波长尺度的数字编码单元,这些单元的数字状态构成了基于可编程超表面的信号调制与波束控制的口面编码序列。通过妥善设计空域和时域口面编码序列,可按指定方式同时对数字信号和远场方向图进行调控。为了实验验证该工作机制,我们提出了一种可编程无线通信系统。该系统可以产生指定方向的单个波束形成单通道信号传输,也可以产生指定的双波束形成双通道独立信号传输。实验结果很好地验证了可编程通信系统的各项功能。本文的研究成果在第五代/第六代(5G/6G)无线通信中以及无人机、自动驾驶等现代智能电子平台中具有重要的应用前景。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

超材料是由大量亚波长尺度单元构成的人工结构,具有操控电磁波特性的能力。已有大量研究针对超材料的表征方式、原理分析、设计应用等方面进行了深入探索,使得超材料已然成为了一门独立的交叉学科[1–6]。早期的研究将超材料视为一种等效媒质进而研究其物理特性,由此产生了一些前所未有的现象,如负折射[7]和隐形斗篷[8]。这些研究成果在世界范围内产生了重大影响,也为超材料的早期研究奠定了基础。作为一种薄层形式的超材料,超表面被提出并用于调控传播波[9–13]与表面波[14–

17]。超表面一般由具有梯度几何特性的单元构成,以产生梯度电磁边界条件,实现对电磁波的调控。然而,近年来提出的一系列可编程数字编码超表面[18–22]表明,数字离散的电磁边界也可以实现对电磁波的调控。若将可编程超表面单元抽象为数字符号,则这些数字符号的不同空间排布形成了不同的数字编码,这些数字编码则确定了可编程超表面的辐射特性。更重要的是,可编程超表面单元的可重构性使得数字编码序列的动态切换成为可能,这种空时动态编码特征使可编程超表面成为众多电磁领域中的一项创新性技术[23–30]。

随着现代社会大规模数据服务的演进,通信频谱资源

* Corresponding authors.

E-mail addresses: wxu@seu.edu.cn (X. Wan), wxu@seu.edu.cn (W. Xu), tjcui@seu.edu.cn (T. Cui).

的利用趋于饱和, 迫使人们探索更高的频段并寻求新的技术来实现更大的信道容量和更快的传输速率。大规模多输入多输出 (MIMO) 技术已被认为是第五代 (5G) 无线通信的关键技术之一[31-36], 但硬件的复杂度阻碍了大规模 MIMO 技术在许多场景的实际应用。尽管已经出现了一些混合技术用于降低其复杂度, 但对于成本敏感的应用场景, 大规模 MIMO 技术依旧显得较为复杂。利用可编程超表面可以构建一种无线通信系统新架构[41-42], 在这一架构中, 通过设计数字编码的周期子帧来调制可编程超表面的频谱, 从而实现调频信号的传播[43-46]。另一项工作利用可编程超表面的不同远场方向图来传输信息, 但是为了恢复完整的远场方向图, 需要许多放置在不同位置的接收器[47]。此外, 基于可编程超表面的 16 高次谐波调制 (QAM) 与 MIMO 传输机制也被提出[48-49]。

可编程超表面也被用作智能反射表面, 用于探索类似甚至超越 MIMO 技术的更多潜在技术[50-58]。这些工作从不同的侧面研究了可编程超表面, 但均无法同步处理数字调制与波束控制。在之前的一项工作中, 我们基于可编程超表面同时实现了近场能量控制与多信道传输[59], 然而这一工作仅对近场的信号幅度进行了调制, 导致其应用场景受限; 此外, 调幅信号的抗干扰能力相比调相信号更弱。本文基于空时编码超表面提出了一种远场相位调制通信, 这项工作极大扩展了基于超表面的通信系统的应用场景。

具体而言, 我们建立了一个基于超表面的新型无线通信系统, 以实现单通道与多通道模式下的远场直接数字信号传输。在单通道模式下, 可编程超表面产生一个定向主波束, 通过调制主波束的辐射相位, 实现数字信号在主波束内的传输。在双通道模式下, 可编程超表面产生两个主波束, 通过独立调制两个主波束的辐射相位, 实现不同数字信号在两个主波束内的独立传输。本工作提供了一种极为灵活的同时实现远场方向图控制与信号传输的方法。本工作的研究成果可极大提高无线通信、雷达探测与成像系统的集成度与灵活性, 完美匹配现代电子信息系统的多功能与智能化趋势。

2. 材料与方法

2.1. 一体化波束控制与信号调制的实现基础

根据惠更斯-菲涅尔衍射原理, 可编程超表面的辐射远场 $U(\theta, \varphi, k)$ 可以通过对孔径场 $U(m\Delta x, n\Delta y, k\Delta t)$ 进行傅里叶变换得到。因此, 当远场确定时, 超表面上相应的孔径场就可以通过逆傅里叶变换得到:

$$U(m\Delta x, n\Delta y, k\Delta t) = \mathcal{F}^{-1}[U(\theta, \varphi, k)] \quad (1)$$

式中, Δx 和 Δy 表示 x 和 y 方向上相邻单元的间距; Δt 表示离散时间间隔; $m\Delta x$ 和 $n\Delta y$ 表示数字编码单元的空间位置; $k\Delta t$ 表示离散时刻; θ 和 φ 表示远场俯仰角和方位角。

如果我们对同一远场方向图引入一个相位项 $e^{j\phi}$, 则可以得到另一个孔径场如下:

$$U_{\phi}(m\Delta x, n\Delta y, k\Delta t) = \mathcal{F}^{-1}[e^{j\phi}U(\theta, \varphi, k)] \quad (2)$$

这两个孔径场可以产生相同的远场方向图, 但是远场相位不同。使用改进的 Gerchberg-Saxton (GS) 算法[26, 58], 可得到对应不同辐射相位的口面编码。按照特定时间序列切换两种数字编码, 可实现空域波束赋形和时域信号调制。

利用这种特性, 可编程超表面可以向特定方向传输数字信号。假设要传输的图片或视频已经被编码成数字信号, 再经过正交数字调制进一步处理形成两个分支: 同相分支 (I) 和正交分支 (Q)。对于四相调制, 瞬时 I/Q 信号有 4 种组合类型 (00、01、10、11), 分别对应 4 种辐射相位。通过配置可编程超表面的口面数字编码, 可实现对应的 4 种辐射相位。图 1 (a) 是基于超表面的无线通信示意图, 其中 I/Q 信号和超表面口面数字编码形成一一映射, 最终信号被超表面传输至指定的方向。

图 1 (b) 展示了具备波束扫描功能的无线通信示意图, 不同用户可在时分模式下独立通信; 图 1 (c) 展示了双通道模式下的无线通信示意图, 此模式下两个用户可以同时独立接收数字信息。在双信道模式中, 信号编码和超表面口面编码的映射操作与单信道模式下有些许不同。在这种情况下, 数字信号由 4 个平行分支表示: 同相分支 (I_1 、 I_2) 和正交分支 (Q_1 、 Q_2)。这 4 个分支的组合被映射到可编程超表面的 16 组数字编码中, 这些数字编码辐射出具有不同相位的两个定向波束, 使得不同方向的用户能独立接收不同的信息。

2.2. 波束扫描与相位调制

图 2 给出了超表面的实物图, 其中超表面包含 400 个数字编码单元, 每个单元由三层金属层与两层介质层构成。第一层介质层的高度为 1.6 mm, 相对介电常数为 2.65; 第二层介质层的高度为 0.2 mm, 相对介电常数为 3。顶部的金属层集成了一个 PIN 二极管 (Skyworks 1320-079)。通过切换 PIN 二极管的导通/断开状态, 数字编码单元的数字状态可以动态变化。中间的金属层作为电磁波的反射面和直流 (DC) 信号的地线。两个金属圆柱体用于加载直流电压。底部金属层是一个扇形结构, 可以扼制

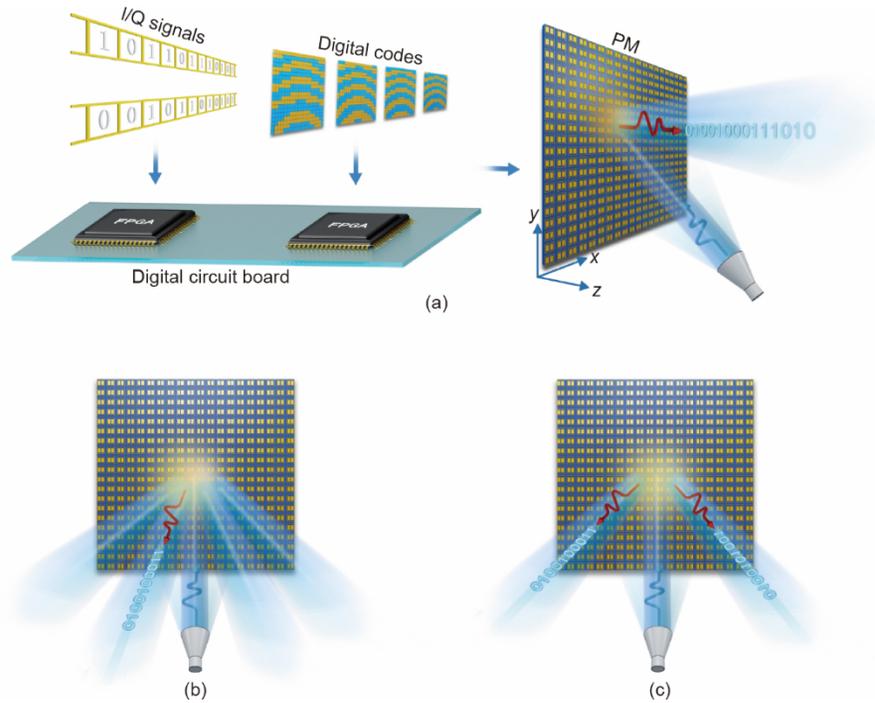


图1. 基于超表面的无线通信示意图。(a) 基于超表面的单信道直接数字信号传输；(b) 波束扫描式直接数字信号传输；(c) 基于超表面的双信道独立数字信号直接传输。

射频信号，降低直流馈电线对单元的射频性能的影响。

在进行可编程超表面的数字编码计算之前，我们使用商用电磁仿真软件（CST Microwave Studio）对数字编码单元进行了仿真，得到了单元导通和截止状态下的反射系数。仿真中，PIN二极管在导通状态下被建模为一个电感（0.75 nH）和一个电阻（0.5 Ω ）串联，在断开状态下被建模为一个电感（0.5 nH）和一个电容（0.24 pF）串联。在10 GHz下，导通状态时单元的反射系数为 $0.861e^{j1.83\pi}$ ，断开状态时单元的反射系数为 $0.985e^{j0.8\pi}$ 。在我们之前的工

作[54]中可以找到更多详细的单元信息。

假设远场是平面波 $U(\theta, \varphi, k) = e^{-jk_0 \cdot r} e^{j\phi}$ ，其中 k_0 为沿平面波传播方向上的波矢量， r 为矢量距离， ϕ 为一常量。图3（a）中，4种可编程超表面的数字编码对应的远场均指向同一方向（ $\theta=45^\circ, \varphi=0^\circ$ ），但是常量 ϕ 从0到 $3\pi/2$ 线性递增，步长为 $\pi/2$ 。图3（d）给出了对应于第一组数字编码的仿真二维远场方向图，显示出主波束出现在指定的方向上。图3（g）给出了对应于4组数字编码的4个远场方向图测量结果，可以看出对于这4种数字编码，主波束

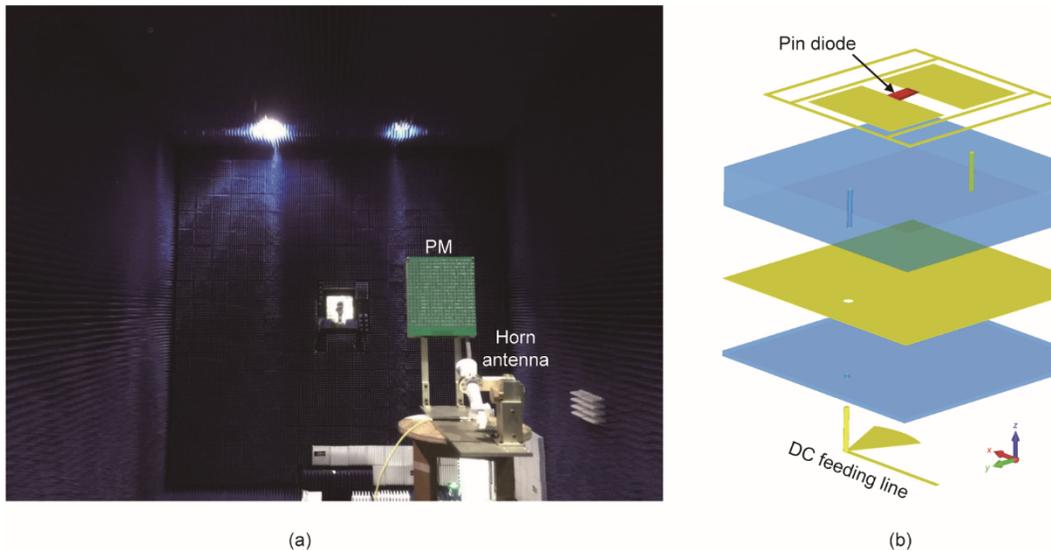


图2. (a) 可编程超表面实物与测试环境照片；(b) 数字编码单元的详细几何结构。

都指向同一指定方向。图3 (j) 记录了主波束的测量相位，其与指定的常量值显示出极佳的一致性。

对方向 $(\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ)$ [图3 (b)、(e)、(h) 和 (k)] 和方向 $(\theta=-45^\circ, \varphi=0^\circ)$ [图3 (c)、(f)、(i) 和 (l)] 进行了类似的处理。在这两种情况下，测量的主瓣方向都与规定值完全吻合。与不同的 ϕ 值相对应的主波束的增益和相位显示出一些偏差，这主要是由于不同数字编码的量化误差、制造误差和模型的不确定性造成的。但

是，后面的实验结果表明，这些误差并不会明显影响基于超表面的无线通信的性能。

尽管可编程超表面上的所有数字编码都是在一个固定的频率 (10 GHz) 和指定的方向上获得的，但相位调制在指定的频率和方向附近仍然有效，这保证了可编程超表面在一体化波束控制和数字调制中的稳健性。图4显示了在 10° 的角度范围和 1 GHz 的频率范围内测试的远场。图4 (a) 显示了 $\phi=0$ 时的测试结果，图4 (b) ~ (d) 显示

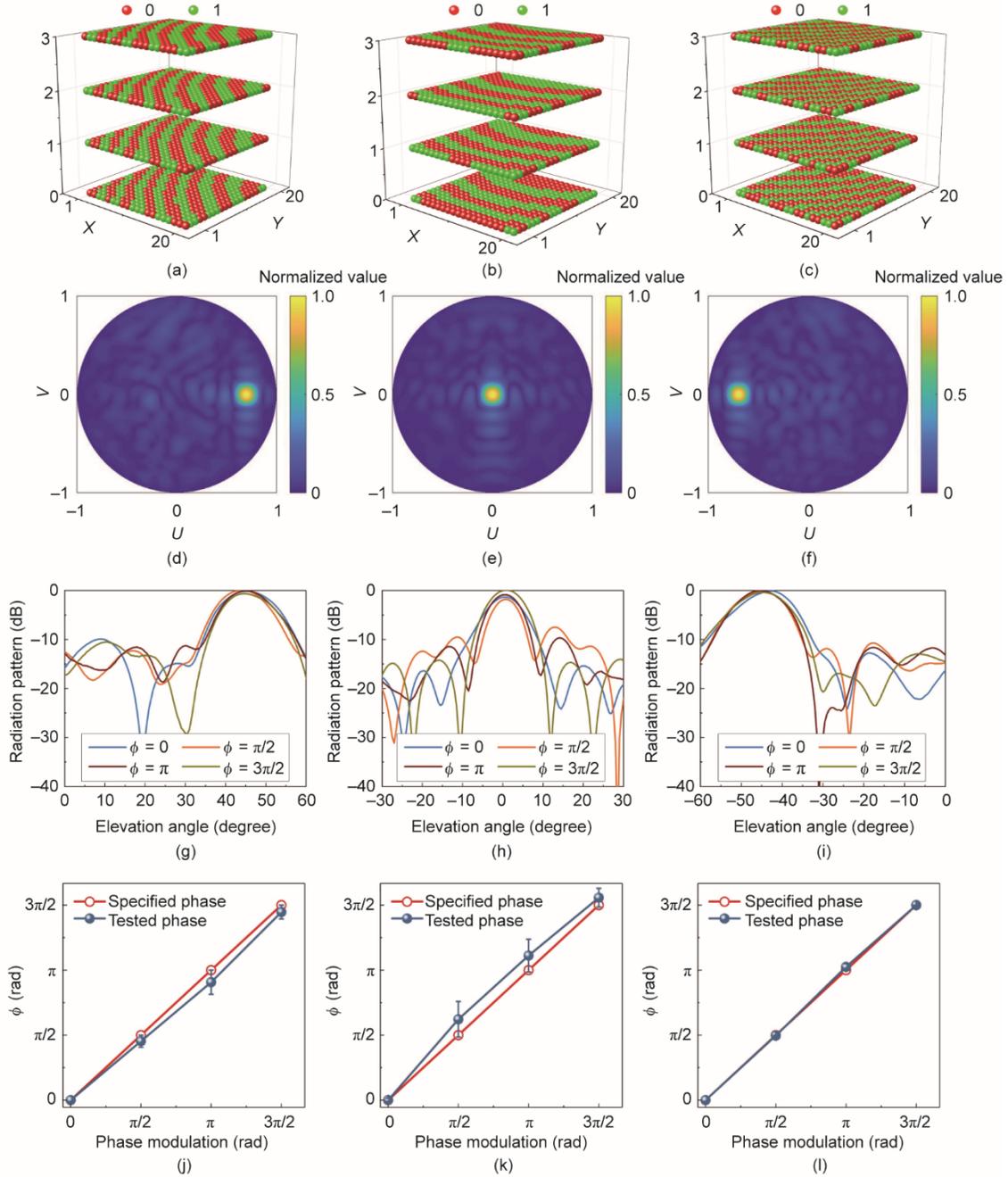


图3. 波束扫描与相位调制结果。(a) ~ (c) 用于波束扫描与相位调制的数字编码图案，其中 (a) 中波束方向为 $(\theta=45^\circ, \varphi=0^\circ)$ ；(b) 中波束方向为 $(\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ)$ ；(c) 中波束方向为 $(\theta=-45^\circ, \varphi=0^\circ)$ 。对于这三组数字编码，相位调制从0递增至 $3\pi/2$ ，步长为 $\pi/2$ 。(d) ~ (f) UV坐标系下的对应远场方向图 ($u = \sin \theta \cos \varphi, v = \sin \theta \sin \varphi$)；(g) ~ (i) 远场方向图测量结果；(j) ~ (l) 各主波束的相位测量值。

了参考图4 (a) 中数值的相位差。可以看出, 由于相位调制是在远场的等相位面上设计的, 因此相位调制在主波束邻近区域和指定频率附近有效, 而在远离主波束的方向上是无效的。

除了相位调制之外, 可编程超表面还可以通过设计不同的数字编码来调制远场的幅度。图5 (a) ~ (d) 展示了二进制幅度调制的一个例子。在图5 (a) 中, 定向波束指向超表面的法线方向, 而在图5 (b) 中, 远场被随机地散射到空间中。因此, 远场在超表面法线方向的场强可以被调控, 继而在超表面的法线方向实现了对远场的二进制幅度调制。图5 (c) 给出了9.5~10.5 GHz的频率范围内超表面法线方向的远场测试幅度。图5 (d) 给出了在不同频率下的测试方向图。测试结果验证了利用可编程超表面实现二进制幅度调制的有效性。由于相位调制相比幅度调制在抗噪声干扰方面有优势, 因此在下文的讨论中将数字信号调制方式选为相位调制。

3. 结果与讨论

3.1. 多通道模式下的波束控制与信号调制

假设使用可编程超表面产生了两个定向波束, 即 $U(\theta, \varphi, \mathbf{k}) = e^{-jk_0 r_1} e^{j\phi_1} + e^{-jk_0 r_2} e^{j\phi_2}$ 。对应的超表面数字编码序列通过 $\mathcal{F}[U(\theta, \varphi, \mathbf{k})]$ 进行计算。可以明显看出, 通过设置

不同的 ϕ_1 和 ϕ_2 , 可以独立控制两波束的辐射相位。图6 (a) ~ (d) 展示了随机指定波束方向时的仿真远场方向图, 此时 ϕ_1 和 ϕ_2 都设为0。结果显示可编程超表面具有将远场偏转到指定的多个方向的能力。

为了解释双波束的独立相位调制, 我们指定了4组 ϕ_1 和 ϕ_2 , 相应的远场方向图包含两个分别指向 $(\theta_1 = 10^\circ, \varphi_1 = 0^\circ)$ 和 $(\theta_2 = -30^\circ, \varphi_2 = 180^\circ)$ 的主波束。对于第一组, ϕ_1 保持为0, ϕ_2 以 $\pi/2$ 为步长递增; 另外三组中 ϕ_2 遵循同样的取值方式, ϕ_1 取值分别为 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ 。图6 (e) ~ (h) 给出了双波束情况下4组远场方向图的测量结果, 图6 (i) ~ (l) 给出了对应主波束的相位测量结果。图7给出了对应的数字编码序列。

对于所有测试组, 测量的远场与相位都归一化到当 ϕ_1 和 ϕ_2 为0时的输出结果。从测量的远场方向图可以看出, 当 ϕ_1 和 ϕ_2 取不同数值时主波束在指定方向的附近区域摇摆。然而, 在主波束附近某个角度范围之内相位调制依旧有效, 这保证了可编程超表面在一体化波束控制与数字调制中的性能稳定性。由于主波束的小幅偏转引起的接收信号强度波动可以由通信系统中的自动增益控制 (AGC) 机制进行补偿。

图3、图6表明可编程超表面可以同时实现远场的波束赋形和相位调制, 这为实现基于超表面的单通道和多通道无线通信奠定了坚实的基础。

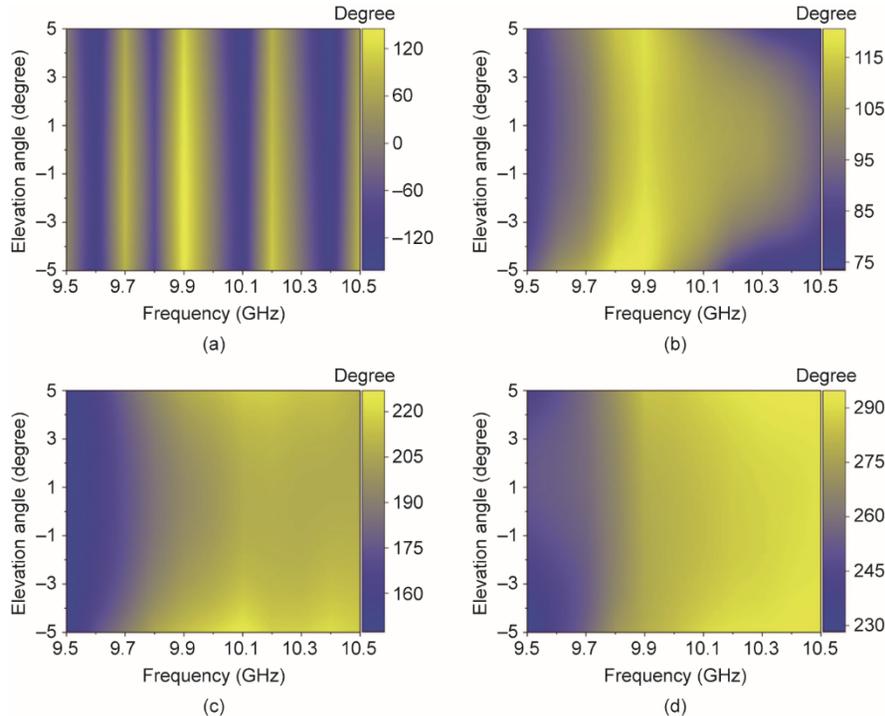


图4. 当设置 ϕ 为不同的值时, 远场的测试相位。横轴为频率范围, 纵轴为角度范围。(a) $\phi=0$ 时的远场测试相位; (b) $\phi=0$ 和 $\phi=\pi/2$ 时的相位差测试结果; (c) $\phi=0$ 和 $\phi=\pi$ 时的相位差测试结果; (d) $\phi=0$ 和 $\phi=3\pi/2$ 时的相位差测试结果。

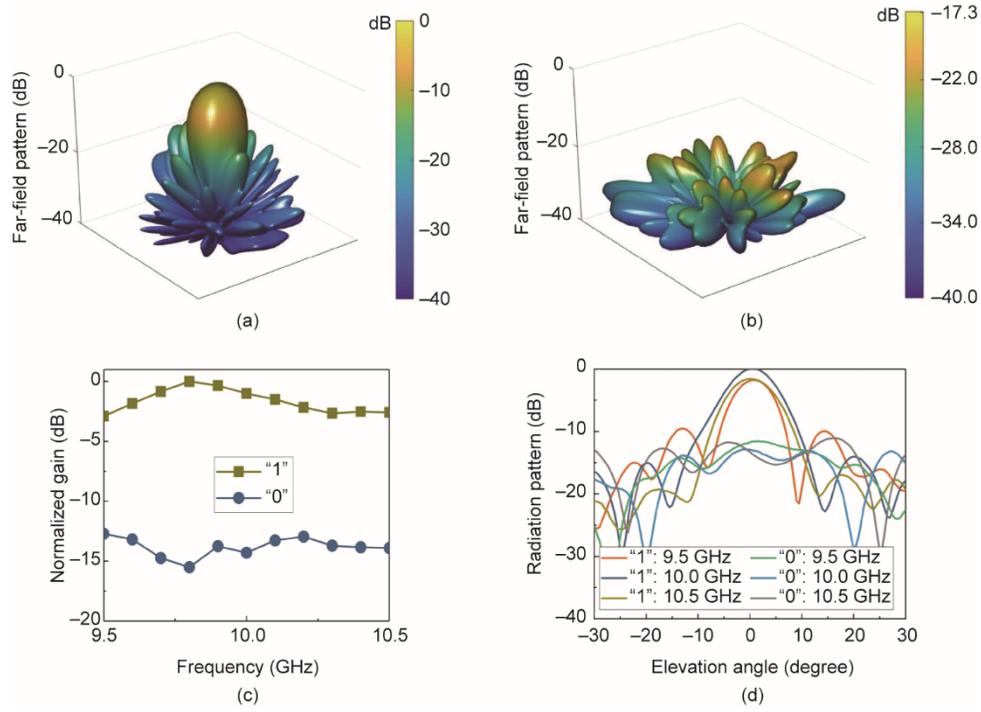


图5. 幅度调制。(a) 远场指向可编程超表面法线方向, 对应于数字信号“1”; (b) 远场随机散射到空间, 对应于数字信号“0”; (c) 不同频率下法线方向上的归一化增益; (d) 不同频率下的方向图。

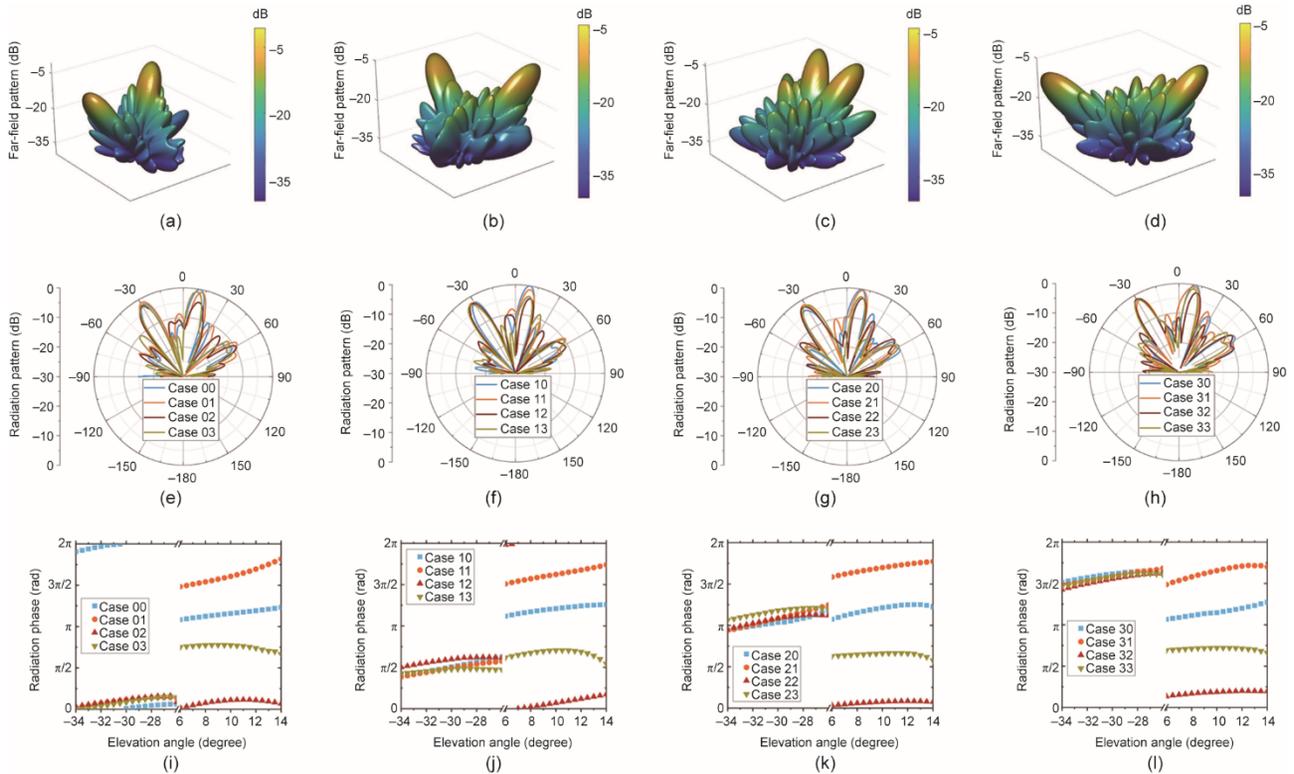


图6. 双波束独立相位调制结果。(a) ~ (d) 指向不同方向的双波束的仿真远场方向图。(a) $(\theta_1=10^\circ, \varphi_1=0^\circ)$, $(\theta_2=-30^\circ, \varphi_2=180^\circ)$; (b) $(\theta_1=33^\circ, \varphi_1=86^\circ)$, $(\theta_2=29^\circ, \varphi_2=315^\circ)$; (c) $(\theta_1=25^\circ, \varphi_1=26^\circ)$, $(\theta_2=28^\circ, \varphi_2=336^\circ)$; (d) $(\theta_1=43^\circ, \varphi_1=134^\circ)$, $(\theta_2=30^\circ, \varphi_2=310^\circ)$; (e) ~ (h) 双波束相位独立指定时的测量方向图; (i) ~ (l) 双波束相位独立指定时的远场测量相位。

3.2. 基于超表面的无线通信系统的数字信息传输

本工作搭建了一个基于超表面的无线通信系统, 图8

给出了上述系统的示意图和实物图。整个系统包含一台发射机、一台接收机和一台计算机。可编程超表面用于实现

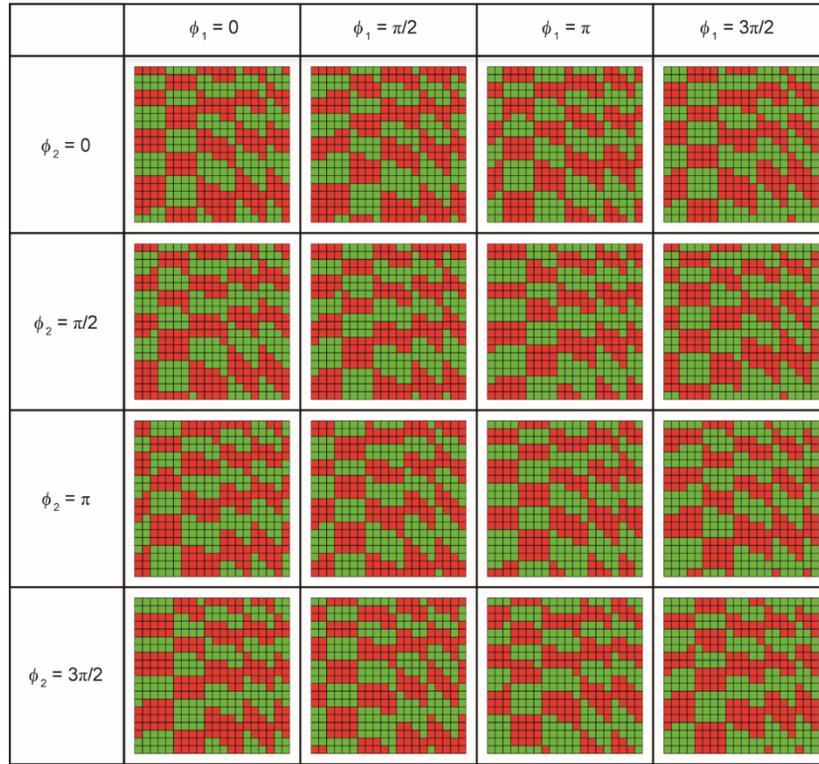
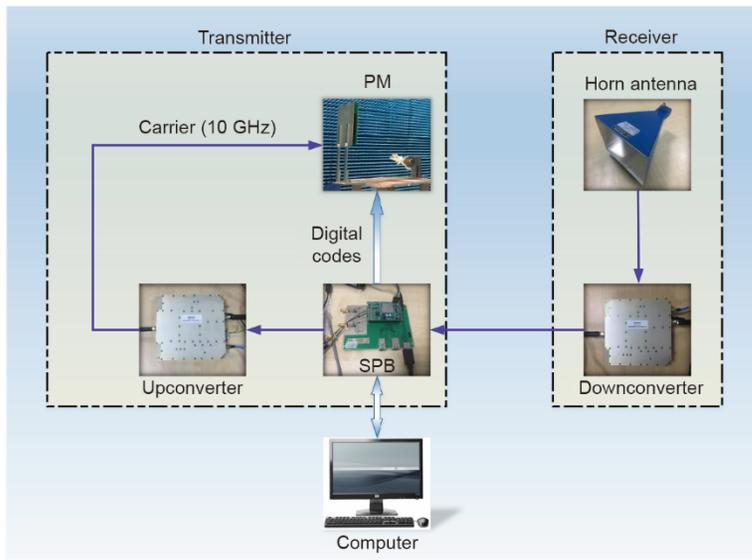


图7. 与 ϕ_1 和 ϕ_2 的不同值相对应的数字编码。红色方块代表处于“off”状态的单元，绿色方块代表处于“on”状态的单元。对于第一列， ϕ_1 保持为零， ϕ_2 以 $\pi/2$ 的步长增加。对于其余几列使用同样的策略，仅将每列 ϕ_1 分别设置为 $\pi/2$ 、 π 和 $3\pi/2$ 。

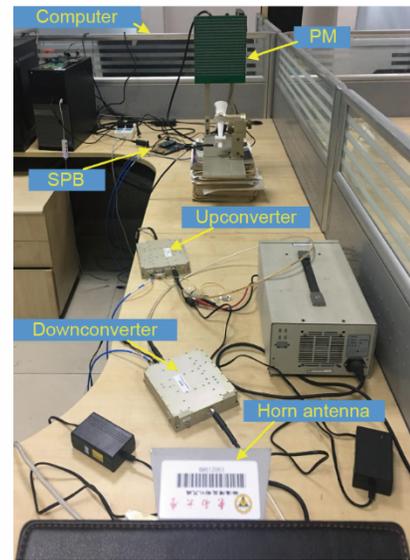
电磁波与数字信号的协同调制功能。一块信号处理板（SPB，包含FPGA和AD9361）从计算机加载数字信息，继而生成对应的可编程超表面数字编码，这些数字编码被用于配置超表面的每一个编码单元。SPB同时产生一个单音载波（1.45 GHz），此载波经过上变频到10 GHz并照射可编程超表面；一个标准喇叭天线被放置于距离超表面

2.4 m的位置用于接收信号，接收到的信号从10 GHz下变频到1.45 GHz，经过进一步解调后发送到计算机进行处理。

对于单通道无线通信，可编程超表面的主波束方向可以偏转。如图9所示，我们开展了两个不同方向上的无线通信实验以验证这一特性。在第一个实验中，我们沿着方



(a)



(b)

图8. 基于超表面的无线通信系统。(a) 示意图；(b) 实物图。

向 ($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$) 的主波束发射并恢复了一张古列尔莫·马可尼的照片。在第二个实验中,我们将主波束偏转至方向 ($\theta=10^\circ, \varphi=0^\circ$)。图9 (a)、(b) 分别给出了对应的实验结果,验证了可编程超表面产生可偏转的无线通信信道的能力。

图10展示了多通道模式下无线通信的实验结果。詹姆斯·麦克斯韦和海因里希·赫兹的照片被用作需要传输的信息。首先,这些照片被编码为媒体访问控制(MAC)层中的帧,每帧包含5844比特(bit)。其次,在每一帧中加入24个循环冗余位,这样接收机就可以通过实施循环冗余检查(CRC)来判断接收信号的正确性。CRC的值越小,接收到的信号误差就越小。完全正确的接收意味着CRC的值为零。接下来用低密度奇偶校验(LDPC)码对帧进行编码,并在帧中加入另一个包含1956 bit的导频序列,以便接收机的解码器能够通过导频序列进行卷积来同步接收帧。最后,整个帧被分为4个子帧。这些帧被加载到数字电路板上,并映射到所设计的可编程超表面的数字编码上。数字编码的切换速度为10 MHz,因此,系统的传输速率为10 Mbit·s⁻¹。

在设计实验中,詹姆斯·麦克斯韦的照片被发射到方向 ($\theta_1=10^\circ, \varphi_1=0^\circ$),海因里希·赫兹的照片被发射到另一个方向 ($\theta_2=-30^\circ, \varphi_2=180^\circ$)。接收机被放置在两个主波束区域以接收照片。首先,接收机被放置在方向 ($\theta_1=10^\circ, \varphi_1=0^\circ$) 附近,计算机恢复了詹姆斯·麦克斯韦的照片,如图10 (a) 所示。然后,将接收机放置在方向 ($\theta_2=-30^\circ, \varphi_2=180^\circ$) 的附近,计算机恢复了海因里希·赫兹的照片,如图10 (b) 所示。当接收机放置在正确的方向时,CRC的记录值为零,表明基于超表面的无线通

信系统的帧错误率在两个通道中都为零,这进一步验证了所提出的无线通信系统的有效性和稳健性。更重要的是,同样的可编程超表面既可以被用于波束扫描式的单通道无线通信,也可以被用于两个任意方向的双通道无线通信。

4. 结论

我们提出了一种融合数字相位调制和远场调控的机制,并实际搭建了基于超表面的无线通信系统,实现了单通道模式和多通道模式的数字信息传输。实验验证了该无线系统的优良性能。所提出的基于超表面的无线通信系统的创新之处包括以下几点:①电磁波和数字信息的调制可同时由可编程超表面的数字编码所实现;②基于超表面的数字调制过程完全数字化,不涉及任何模拟信号,因此不需要数模转换器和混频器;③无线通信的单通道和多通道模式都在同一可编程超表面口面上实现;④用于入射可编程超表面的电磁波是由一个分立的射频链路产生的单频波,这种结构使基于超表面的电磁系统深度数字化和集成化,并使系统更加灵活,易于实现。总的来说,由于现代电子信息系统正朝着智能化和多功能集成的方向发展,本文所提出的系统将可作为一个可编程的平台,用于多功能集成与智能化领域,如智能无线通信、雷达探测与成像等。

致谢

本工作得到了以下项目的资助:国家自然科学基金组织间国际(地区)合作研究项目(61761136007)、国家重

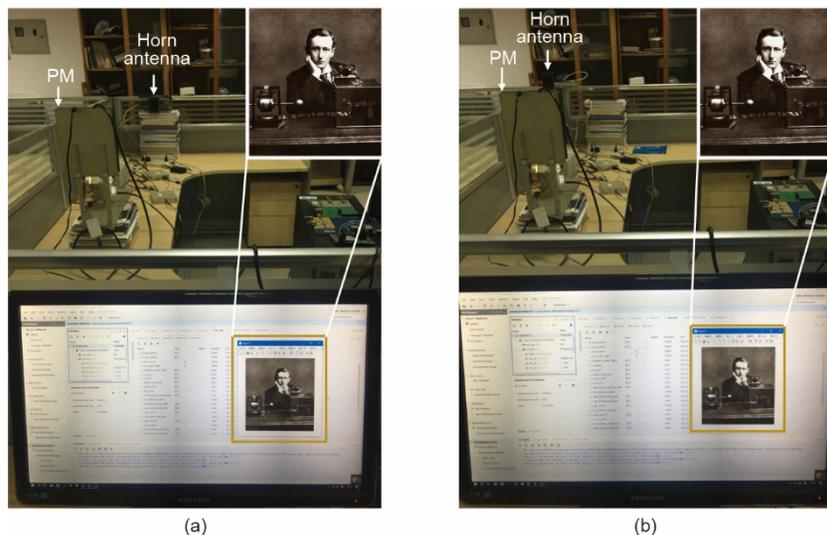


图9. 单通道无线通信实验。(a) 主波束方向为 ($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$) 的情形;(b) 主波束方向为 ($\theta=10^\circ, \varphi=0^\circ$) 的情形。

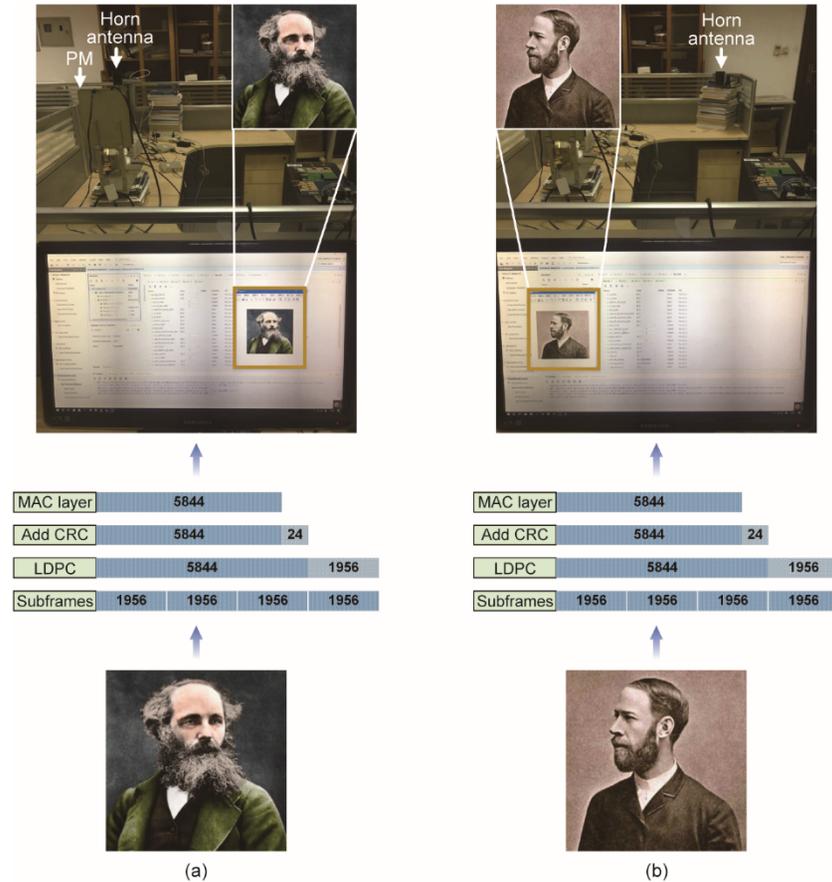


图10. 多通道无线通信实验。(a) 发射到方向为 $(\theta_1=10^\circ, \varphi_1=0^\circ)$ 的信道以及被恢复的詹姆斯·麦克斯韦的照片；(b) 发射到方向为 $(\theta_2=-30^\circ, \varphi_2=180^\circ)$ 的信道以及被恢复的海因里希·赫兹的照片。

点研发计划 (2017YFA0700201、2017YFA0700202 和 2017YFA0700203)、国家自然科学基金项目 (62170-10363、61631007、61571117、61501112、61501117、61871109、61522106、61731010、61735010、61722106、61701107、61701108)、江苏省自然科学基金项目 (BK20211161)、111 项目 (111-2-05)、东南大学至善学者项目。

Compliance with ethics guidelines

Xiang Wan, Chaokun Xiao, He Huang, Qiang Xiao, Wei Xu, Yueheng Li, Joerg Eisenbeis, Jiawei Wang, Ziai Huang, Qiang Cheng, Shi Jin, Thomas Zwick, and Tiejun Cui declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Smith DR, Schultz S, Markos P, Soukoulis CM. Determination of effective

permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Phys Rev B* 2002;65(19):195104.

[2] Zhang S, Fan W, Panoiu NC, Malloy KJ, Osgood RM, Brueck SR. Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. *Phys Rev Lett* 2005;95(13):137404.

[3] Schurig D, Mock JJ, Justice BJ, Cummer SA, Pendry JB, Starr AF, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science* 2006; 314(5801):977–80.

[4] Liu N, Guo H, Fu L, Kaiser S, Schweizer H, Giessen H. Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies. *Nat Mater* 2008;7(1):31–7.

[5] Chen H, Chan CT, Sheng P. Transformation optics and metamaterials. *Nat Mater* 2010;9(5):387–96.

[6] Luo Y, Fernandez-Dominguez AI, Wiener A, Maier SA, Pendry JB. Surface plasmons and nonlocality: a simple model. *Phys Rev Lett* 2013;111(9):093901.

[7] Smith DR, Pendry JB, Wiltshire MCK. Metamaterials and negative refractive index. *Science* 2004;305(5685):788–92.

[8] Cai W, Chettiar UK, Kildishev AV, Shalaev VM. Optical cloaking with metamaterials. *Nat Photon* 2007;1:224–7.

[9] Yu N, Genevet P, Kats MA, Aieta F, Tietjen JP, Capasso F, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science* 2011;334(6054):333–7.

[10] Kildishev AV, Boltasseva A, Shalaev VM. Planar photonics with metasurfaces. *Science* 2013;339(6125):1232009.

[11] Kim M, Wong AMH, Eleftheriades GV. Optical Huygens' metasurfaces with independent control of the magnitude and phase of the local reflection coefficients. *Phys Rev X* 2014;4(4):041042.

[12] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater* 2014;13(2): 139–50.

[13] Wan X, Zhang L, Jia SL, Yin JY, Cui TJ. Horn antenna with reconfigurable beam-refraction and polarization based on anisotropic huygens metasurface. *IEEE Trans Antennas Propag* 2017;65(9):4427–34.

[14] Holloway CL, Kuester EE, Gordon JA, Booth JC, Ohara J, Smith D. An

- overview of the theory and applications of metasurfaces: the two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE Antennas Propag M* 2012;54(2):10–35.
- [15] Sun S, He Q, Xiao S, Xu Q, Li X, Zhou L. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves. *Nat Mater* 2012; 11(5): 426–31.
- [16] Martini E, Mencagli M, González-Ovejero D, Maci S. Flat optics for surface waves. *IEEE Trans Antennas Propag* 2016;64(1):155–66.
- [17] Wan X, Chen TY, Zhang Q, Yin JY, Tao Z, Zhang L, et al. Manipulations of dual beams with dual polarizations by full-tensor metasurfaces. *Adv Opt Mater* 2016;4(10):1567–72.
- [18] Cui TJ, Qi MQ, Wan X, Zhao J, Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light Sci Appl* 2014; 3(10): e218.
- [19] Cui TJ, Liu S, Zhang L. Information metamaterials and metasurfaces. *J Mater Chem C* 2017;5:3644–68.
- [20] Liu S, Cui TJ. Concepts, working principles, and applications of coding and programmable metamaterials. *Adv Opt Mater* 2017;5(22):1700624.
- [21] Zhang L, Chen XQ, Liu S, Zhang Q, Zhao J, Dai JY, et al. Space-time-coding digital metasurfaces. *Nat Commun* 2018;9(1):4334.
- [22] Li L, Cui TJ. Information metamaterials-from effective media to real-time information processing systems. *Nanophotonics* 2019;8(5):703–24.
- [23] Wan X, Qi MQ, Chen TY, Cui TJ. Field-programmable beam reconfiguring based on digitally-controlled coding metasurface. *Sci Rep* 2016;6(1):20663.
- [24] Yang H, Cao X, Yang F, Gao J, Xu S, Li M, et al. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control. *Sci Rep* 2016;6(1): 35692.
- [25] Wan X, Chen TY, Chen XQ, Zhang L, Cui TJ. Beam forming of leaky waves at fixed frequency using binary programmable metasurface. *IEEE Trans Antennas Propag*. 2018;66(9):4942–7.
- [26] Li L, Cui TJ, Ji W, Liu S, Ding J, Wan X, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms. *Nat Commun* 2017;8(1):197.
- [27] Li L, Ruan H, Liu C, Li Y, Shuang Y, Alù A, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager. *Nat Commun* 2019;10(1):1082.
- [28] Luo ZL, Cheng YQ, Cao KC, Qin YL, Wang HQ. Microwave computational imaging in frequency domain with reprogrammable metasurface. *J Electron Imag* 2018;27(6):063019.
- [29] Han J, Li L, Tian S, Liu G, Liu H, Shi Y. Millimeter-wave imaging using 1-Bit programmable metasurface: simulation model, design, and experiment. *IEEE J Em Sel Top C* 2020;10(1):52–61.
- [30] Liu GY, Li L, Han JQ, Liu HX, Gao XH, Shi Y, et al. Frequency-domain and spatial-domain reconfigurable metasurface. *ACS Appl Mater Interfaces* 2020;12 (20):23554–64.
- [31] Rusek F, Persson D, Lau BK, Larsson EG, Marzetta TL, Edfors O, et al. Scaling up MIMO: opportunities and challenges with very large arrays. *IEEE Signal Process Mag* 2013;30(1):40–60.
- [32] Larsson EG, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta TL. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Commun Mag* 2014;52(2):186–95.
- [33] Swindlehurst AL, Ayanoglu E, Heydari P, Capolino F. Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution? *IEEE Commun Mag* 2014;52(9):56–61.
- [34] Agiwal M, Roy A, Saxena N. Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Commun Sur Tut* 2016;18(3):1617–55.
- [35] Ahmed I, Khammari H, Shahid A, Musa A, Kim KS, Poorter ED. A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: architecture and system model perspectives. *IEEE Commun Sur Tut* 2018;20(4):3060–97.
- [36] Heath RW, González-Prelcic N, Rangan S, Roh W, Sayeed AM. An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE J Sel Top Signal Process* 2016;10(3):436–53.
- [37] Liang L, Xu W, Dong X. Low-complexity hybrid precoding in massive multiuser MIMO systems. *IEEE Wire Commun Lett* 2014;3(6):653–56.
- [38] Venkateswaran V, Pivitt F, Guan L. Hybrid RF and digital beamformer for cellular networks: algorithms, microwave architectures, and measurements. *IEEE Trans Micro Theory Tech* 2016;64(7):2226–43.
- [39] Molisch AF, Ratnam VV, Han S, Li Z, Nguyen SLH, Li L, et al. Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey. *IEEE Commun Mag* 2017; 55(9): 134–41.
- [40] Sun L, Qin Y, Zhuang Z, Chen R, Zhang Y, Lu J, et al. A robust secure hybrid analog and digital receive beamforming scheme for efficient interference reduction. *IEEE Access* 2019;7:22227–34.
- [41] Zhao J, Yang X, Dai JY, Cheng Q, Li X, Qi NH, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems. *Nat Sci Rev* 2019;6:231–8.
- [42] Dai JY, Tang WK, Zhao J, Li X, Cheng Q, Ke JC, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface. *Adv Mater Tech* 2019;4(7):1900044.
- [43] Dai JY, Zhao J, Cheng Q, Cui TJ. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface. *Light Sci Appl* 2018;7(90).
- [44] Tang W, Dai J, Chen M, Li X, Cheng Q, Jin S, et al. The future of wireless? *Electron Lett* 2019;55(7):360–1.
- [45] Tang WK, Li X, Dai JY, Jin S, Zeng Y, Cheng Q, et al. Wireless communications with programmable metasurface: transceiver design and experimental results. *China Commun* 2019;16(5):46–61.
- [46] Tang W, Chen MZ, Chen X, Dai JY, Han Y, Renzo MD, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss, modeling and experimental measurement. 2019. arXiv:1911.05326.
- [47] Cui TJ, Liu S, Bai GD, Ma Q. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface. *Research* 2019;2584509.
- [48] Tang WK, Dai JY, Chen MZ, Wang KK, Li X, Zhao X, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system desing, analysis, and implementation. 2019. arXiv:1912.09955.
- [49] Dai JY, Tang W, Yang LX, Li X, Chen MZ, Ke JC, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface. *IEEE Trans Antennas Propag* 2020;68(3):1618–27.
- [50] Hu S, Rusek F, Edfors O. Beyond massive MIMO: the potential of data transmission with large intelligent surfaces. *IEEE Trans Signal Proc* 2018;66 (10):2746–58.
- [51] Hu S, Rusek F, Edfors O. Beyond massive MIMO: the potential of positioning with large intelligent surfaces. *IEEE Trans Signal Proc* 2018;66(7):1761–74.
- [52] Wu Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming. *IEEE Trans Wire Commun* 2019;18(11): 5394–409.
- [53] Wu Q, Zhang R. Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network. *IEEE Commun Mag* 2020; 58(1): 106–12.
- [54] Renzo MD, Zappone A, Debbah M, Alouini MS, Yuen C, de Rosny J, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and road ahead, *IEEE J Sel Areas Commun* 2020;38(11):2450–525.
- [55] Abeywickrama S, Zhang R, Yuen C. Intelligent reflecting surface: practical phase shift model and beamforming optimization. In: *Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Communications*; 2020 Jun 7–11; Dublin, Ireland. New York: IEEE; 2020. p. 1–6.
- [56] Huang C, Hu S, Alexandropoulos GC, Zappone A, Yuen C, Zhang R, et al. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: opportunities, challenges, and trends. *IEEE Wirel Commun* 2020;27(5):118–25.
- [57] Huang C, Zappone A, Alexandropoulos GC, Debbah M, Yuen C. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication. *IEEE Trans Wirel Commun* 2019;18(8):4157–70.
- [58] Renzo MD, Debbah M, Phan-Huy DT, Zappone A, Alouini MS, Yuen C, et al. Smart radio environments empowered by AI reconfigurable meta-surfaces: an idea whose time has come, *Eurasip J Wirel Comm* 2019;129.
- [59] Wan X, Zhang Q, Chen TY, Zhang L, Xu W, Huang H, et al. Multichannel direct transmissions of near-field information. *Light Sci Appl* 2019;8:60.