

透射式时域编码超表面无线通信系统

韩嘉宇, 戴俊彦, 程 强*

(东南大学信息科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘要: 随着现代通信需求的不断增长与射频技术的快速发展, 基于超表面的无线通信系统因具有轻量化、高效性、低成本的显著优势, 已成为实现下一代无线通信和雷达系统的关键技术之一, 吸引了国内外研究者的广泛关注. 本文提出一种基于 1 bit 透射式超表面的无线通信系统. 研究设计了一款工作频段为 4.75~5.65 GHz 的低损耗透射式超表面, 可以对透射电磁波实现 180° 的相位调控. 同时, 通过改变超表面控制信号的时间延迟和占空比, 该超表面可以进一步实现 2 bit 的精准相位信息调制. 基于上述理论方法, 构建了一套工作在 5 GHz 频率处的高效正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 无线通信系统. 测试结果表明, 该系统成功实现了高质量的 QPSK 信息调制, 并能够完成稳定且精确的定向通信. 研究结果充分展现了透射式时域编码超表面在无线通信领域的优越性能和应用潜力, 为下一代超表面通信系统的设计与优化提供了重要的理论依据和技术支持.

关键词: 透射式超表面; 低损耗; 时域编码超表面; 无线通信; QPSK 调制

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2023YFB3811502, No. 2024YFB2907800); 国家杰出青年科学基金 (No. 62225108); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 2242022k60003); 国家自然科学基金 (No. 62288101, No. 62201139); 江苏省应用数学科学研究中心 (No. BK20233002); 江苏省基础研究计划重点项目 (No. BK20243028); 中央高校基本科研业务费专项资金 (No. 2242024RCB0005)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)12-4279-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250343

Wireless Communications Based on Transmissive Time-Domain Coding Metasurface

HAN Jia-yu, DAI Jun-yan, CHENG Qiang*

(School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: With the continuous growth of modern communication demands and the rapid development of RF technologies, metasurface-based wireless communication systems have emerged as one of the key technologies for next-generation wireless communication and radar systems due to their remarkable advantages of lightweight design, high efficiency, and low cost, attracting extensive attention from researchers worldwide. In this paper, we propose a wireless communication system based on a 1 bit transmissive metasurface. Specifically, we designed a low-loss transmissive metasurface operating in the 4.75~5.65 GHz frequency band, capable of achieving 180° phase modulation of transmitted electromagnetic waves. Furthermore, the metasurface can realize 2 bit precise phase modulation by adjusting the time delay and duty cycle of control signals. Based on this theoretical framework, we established an efficient QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) wireless communication system at 5 GHz. Experimental results demonstrate that the system successfully achieves high-quality QPSK modulation and enables stable, accurate directional communication. These findings fully illustrate the superior performance and application potential of time-domain coded transmissive metasurfaces in wireless communications, providing important theoretical foundations and technical support for the design and optimization of next-generation metasurface communication systems.

Key words: transmissive metasurface; low-loss; time-domain coding metasurface; wireless communications; QPSK modulation

Foundation Item(s): National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB3811502,

No.2024YFB2907800); National Science Foundation (NSFC) for Distinguished Young Scholars of China (No.62225108); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242022k60003); National Natural Science Foundation of China (No.62288101, No.62201139); Jiangsu Provincial Scientific Research Center of Applied Mathematics (No. BK20233002); Jiangsu Science and Technology Research Plan (No. BK20243028); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.2242024RCB0005)

1 引言

随着5G的大规模商用与6G的充分讨论,对无线通信系统速率、延迟和稳定性的要求不断提高,这导致硬件的成本和复杂性显著增加.以射频模块^[1]和天线^[2]为例,它们作为无线通信系统的核心组件,负责数字信号与电磁信号间的转换,从而实现信息的无线传输.然而,在5G通信系统中,由于需要支持多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)架构所需的多通道射频链路,硬件实现面临着前所未有的挑战.尤其是在5 GHz频段,天线耦合、功率控制和电磁兼容性问题进一步制约了系统的性能.因此,为了突破上述技术瓶颈,开发新型无线通信系统成为了通信和微波领域的重要研究方向之一.

在这一背景下,电磁超表面(Metasurface)技术因其卓越的电磁调控能力,引起了学术界与工业界的共同关注^[3-5].电磁超表面是由亚波长人工微结构组成的二维平面器件,能够通过精密设计的单元结构动态调控电磁波的相位、幅度、极化和频率等波前参数^[6-13].例如,基于超表面微纳结构的视网膜成像技术能够实现高分辨率成像^[9].在电磁探测与感知领域,超表面被用于开发高灵敏度的探测系统,能够精确感知电磁波的变化^[10].此外,超表面还被应用于构建衍射神经网络,通过调控电磁波来实现波传感、识别和无线通信^[11].在隐身技术方面,基于超表面的自适应隐身斗篷能够动态调节电磁波的反射特性,从而实现物体的隐身效果^[12].最后,超表面还被用于波达角探测系统,通过精确控制电磁波的相位和幅度来实现对目标方向的快速探测^[13].作为多学科交叉的研究领域,电磁超表面融合了物理、化学、材料科学、电子工程和信息技术等多个学科,不仅催生了许多令人惊叹的现象和器件,还在国际上取得了一系列重要成果,展现了广阔的应用前景.

目前,基于超表面技术的无线通信系统已取得了显著进展.文献[14]提出了一种基于时域数字编码超表面的非线性谐波调控方法,通过动态调制反射相位实现了高效谐波能量转换与频谱重构,并基于此设计了一种新型二进制频移键控(Binary Frequency Shift Keying, BFSK)无线通信系统,显著简化了传统外差式架构的硬件复杂度.文献[15]提出了一种基于异步时空编码数字超表面(Asynchronous Space-Time-Coding

digital Metasurface, A-STCM)的多频段独立调控方法,通过分区域异步调制策略实现了8通道频分复用无线通信系统,显著降低了传统射频链路的高功耗与硬件复杂性.文献[16]提出了一种基于各向异性时空编码数字超表面的空间-频率-偏振分复用无线通信系统,通过独立调控正交偏振方向的时变反射系数与动态时延梯度,实现频率-偏振-分频多路复用调制,在简化系统架构的同时将信道容量提升至传统单极化化系统的2倍.这些研究不仅验证了超表面在电磁波多频段调控与多维复用方面的卓越能力,还展现了其在低成本、低损耗和高功率效率上的巨大潜力.这些特性使得超表面技术成为解决传统无线通信系统中射频链路冗余、频谱资源受限等问题的理想选择.

尽管基于超表面技术的无线通信系统展现出诸多优势,但在实际应用中仍面临关键问题:首先,当前研究主要集中于反射式超表面技术,其剖面高度较高,难以满足低剖面需求;其次,反射式超表面的工作模式制约了收发天线共址部署,容易引发自干扰问题,影响接收灵敏度.相比之下,透射式超表面,单元高度较低,能够实现更薄的整体结构.此外,透射式超表面允许电磁波穿透传播,使收发天线能够灵活布置在同一侧,显著降低自干扰风险.

基于此,本文提出了一种基于透射式时域编码超表面的无线通信系统设计方案.该方案首先设计了一款工作频段为4.75~5.65 GHz的透射式超表面,通过动态控制PIN(Positive-Intrinsic Negative diode)二极管的开关状态,实现对透射电磁波180°相位的精确调控.在此基础上,结合时域编码理论,通过改变超表面控制信号的时间延迟与占空比,进一步在谐波频率上实现了等效2 bit精确相位调制.如图1所示,该系统首先将待传信息编码为二进制数据比特流,通过时域编码映射生成超表面的控制信号,并由控制电路配置到超表面上;馈源天线发射载波信号至超表面,超表面根据控制信号对载波信号进行相位调制,调制后的信号从超表面另一侧射出;接收天线接收到调制后的射频信号后将其传递至软件无线电平台(USRP-2974),USRP-2974完成解调并还原出原始信息.最终,在室内环境中完成了正交相移键控(Quadrature Phase Shift Keying, QPSK)调制方案的空口无线通信,实现了视频的实时传输.与传统通信系统相比,该系统通过调节超表面透射系数直

接完成基带信号的调制和发射,无须依赖混频器、滤波器等复杂器件或模块,可为未来无线通信系统的创新发展提供新的思路和方向。

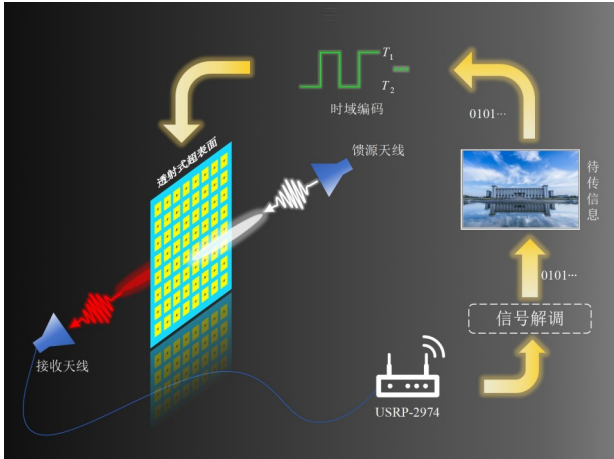


图1 透射式时域编码超表面无线通信系统示意图

2 时域编码超表面的基本电磁调控原理

透射式时域编码超表面是通过周期性变化的透射系数实现对电磁波的调控,超表面上的所有单元均具有相同的时变透射系数 $T(t)$ 。当单色平面波 $E_i(t)$ 垂直入射时域编码超表面时,透射波 $E_t(t)$ 的表达式可写为

$$E_t(t) = E_i(t) \cdot T(t) \quad (1)$$

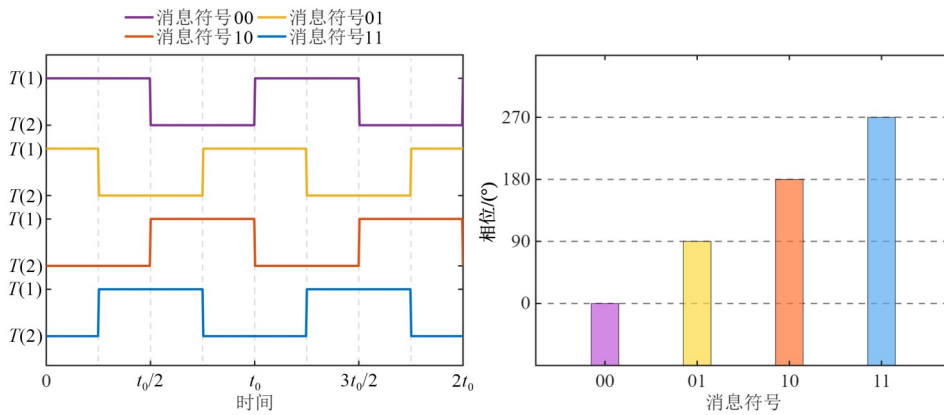


图2 QPSK消息映射方式

3 1 bit透射式超表面的设计与优化

为实现所提出的无线通信系统,本文设计了一种具有1 bit相位调控功能的透射式超表面,其单元结构的三视图如图3(b)~图3(d)所示。该单元采用多层堆叠结构,由5层金属层和5层介质层交替排列组成。金属层沿z轴负方向依次为接收层、第1地层、馈电层、第2地层和发射层,各金属层厚度均为0.036 mm。在垂直方向上,接收层与发射层通过直径为0.98 mm的圆柱形馈电柱实现贯通连接,同时接收层与馈电层之间通过

其中,透射系数 $T(t)$ 在1个周期内被均匀分为 N 个时隙,每个时隙内保持不变。文献[17]中分析指出,透射波的频谱将由一系列谐波分量构成,频率为 $f_c + kf_0$,其中, f_c 、 f_0 和 k 分别为入射波频率、调制频率和谐波阶数。同时,通过设计数字编码序列的占空比 M 和时间延迟 t_0 ,可以独立调控各阶谐波的幅度和相位^[17]。其中,占空比 M 只影响谐波的幅度大小,而时间延迟 t_0 则用于调节谐波的相位分布。

这种调控机制使时域编码超表面能够实现更高比特的相位调制效果,进而实现高阶调制。以QPSK调制为例,如图2所示,每个消息符号分别映射到不同相位 (0° 、 90° 、 180° 、 270°),从而实现2 bit信息调制。通过精确控制占空比 M 和时间延迟 t_0 ,时域编码超表面能够生成符合QPSK调制需求的相位变化。其中,前期相关研究表明^[18],时域编码超表面的各阶谐波相位与时延 t_0 之间存在线性关系,其中第 k 阶谐波的相位关于时延 t_0 的斜率为 $-k$ 。同时,当占空比 M 为0.5时,+1阶谐波的幅度将达到最大值。因此,本文将在1 bit透射式超表面基础上,在1个周期内设计4种时延,生成4种特定相位的透射系数,并将其映射至所需的消息符号上,从而实现QPSK调制方案。这种基于时域编码的调控方法不仅提升了信号调制的灵活性,简化了系统设计,还优化了频谱利用效率,为高效无线通信系统设计提供了可靠的理论依据和新的技术途径。

直径为0.4 mm的圆柱形馈电柱进行连接。馈电层采用扇形电容馈电贴片设计,并通过合理排布馈电线及过孔结构,实现了交直流信号的有效隔离。该单元的几何参数经过CST Microwave Studio微波工作室的优化设计,具体尺寸如下: $l_1=27.00$ mm, $l_2=15.17$ mm, $l_3=13.04$ mm, $l_4=1.77$ mm, $l_5=8.90$ mm, $p_1=27.00$ mm, $p_2=4.55$ mm, $p_3=1.28$ mm, $p_4=7.1$ mm, $h=5.56$ mm。上述结构参数是通过多参数优化后确定的最优尺寸,确保了单元在目标频段内实现最佳的电磁性能。

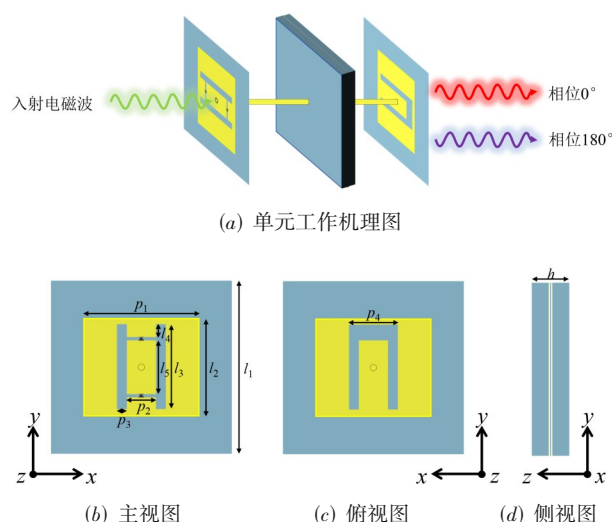


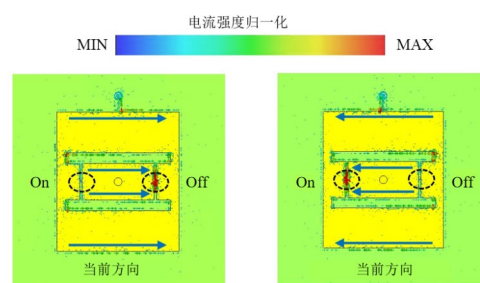
图3 1 bit透射式单元工作机理图及单元结构图

介质层材料选择方面,接收层与第1地层之间以及第2地层与传输层之间均采用F4B材料,其介电常数为2.65,损耗角正切为0.001 5,厚度为2.50 mm. 第1地层与馈电层之间采用Rogers RO4450F材料,其介电常数为3.7,损耗角正切为0.004,厚度为0.16 mm. 馈电层与第2地层之间则采用Rogers RO4450F材料(介电常数3.7,损耗角正切0.004,厚度0.16 mm)与Rogers RO4350B材料(介电常数3.66,损耗角正切0.003 7,厚度0.168 mm)复合构成.

在接收层的矩形金属缝中,集成了2个PIN二极管(MADP-000907-14020),其正极连接内侧贴片,负极连接外侧贴片. 通过调控PIN二极管的开关状态,可实现电磁波透射相位的动态调节. 具体而言,当2个PIN二极管的引脚分别处于OFF-ON状态(编码“0”)和ON-OFF状态(编码“1”)时,透射电磁波将产生180°的相位差,从而实现数字编码态的切换功能.

为了更直观地研究超表面单元的电磁特性,我们在5 GHz频段下对单元表面的电流分布进行了电磁仿真,结果如图4所示. 图4(a)展示了“0”状态下的电流分布,此时PIN1管导通,电流从PIN2管一侧流向PIN1管一侧. 图4(b)则展示了“1”状态下的电流分布,此时PIN2管导通,电流从PIN1管一侧流向PIN2管一侧. 通过对比图4(a)和图4(b)可以发现,2种状态下的电流分布呈现对称特性. 这种对称性源于单元结构在左右两侧的对称设计,当改变2个二极管的通断组合时,电流流向也随之对称变化,从而形成了2种对称的拓扑结构,最终实现180°的相位差.

为了仿真该单元的幅度及相位响应特性,本文采用了CST场路联合仿真的方法. 如图5左图所示,首先在单元结构上设置离散端口以连接相位调节所需的



(a) “0”状态下的电流分布 (b) “1”状态下的电流分布

图4 电流分布图

PIN二极管,并将单元四周设置为周期边界条件. 在 z 轴正方向与负方向分别设置前向和反向Floquet端口,用于实现TE和TM这2种极化模式的电磁激励. 通过在CST 3D仿真求解器中对单元结构进行全波仿真,得到包含4个激励端口的散射参数矩阵,并将其导出为touchstone文件,即SnP文件. 随后,将SnP文件导入CST电路求解器并进行电路仿真,如图5右图所示. 设置4个端口与SnP文件中对应端口相连接,其余端口则与相位调节电路的元器件结构连接以实现电路连接. 由此实现该单元的CST场路联合仿真,得到该单元的幅度和相位响应特性.

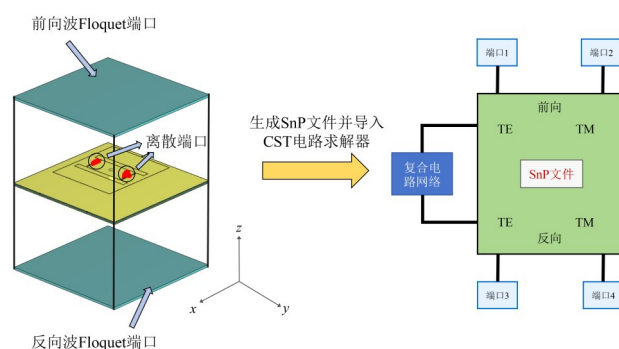


图5 CST场路联合仿真设置示意

图6(a)与图6(b)分别展示了单元的透射幅度和相位响应结果. 在4.75~5.65 GHz频段范围内,单元的透射幅度优于-3 dB,且相位差稳定在180°左右,波动范围控制在±5%以内,充分说明所设计单元具备良好的1 bit相位特性. 此外,在4.82~5.31 GHz频段内,单元的透射系数始终高于-1 dB,并在4.89 GHz频点处达到-0.54 dB的最低损耗. 仿真结果表明,该单元在较宽频带范围内实现了透射相位的高效调控,同时具有较低的透射损耗,满足本文的设计需求.

基于仿真优化结果,笔者制备了一个由 8×8 单元组成的低损耗1 bit透射式时域编码超表面样品,如图7所示. 样品采用列控设计,每列单元通过偏置线共享控制电压,可实现8列独立控制. 如图8所示,超表面的控制电路采用基于DAC(Digital to Analog Converter)的集

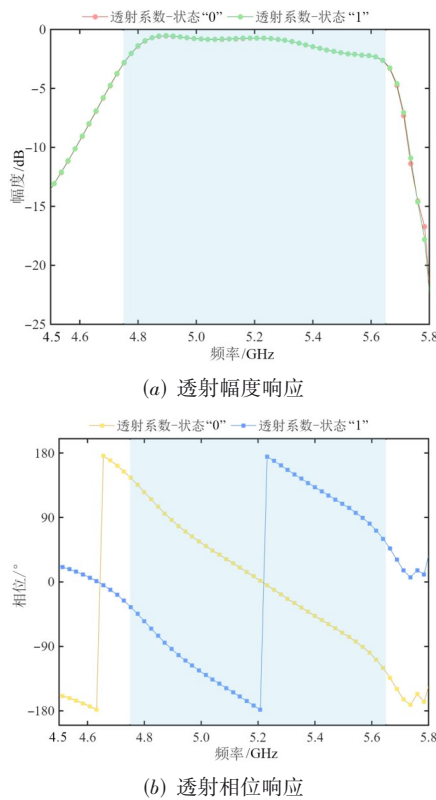


图6 1 bit透射超表面单元电磁参数仿真结果

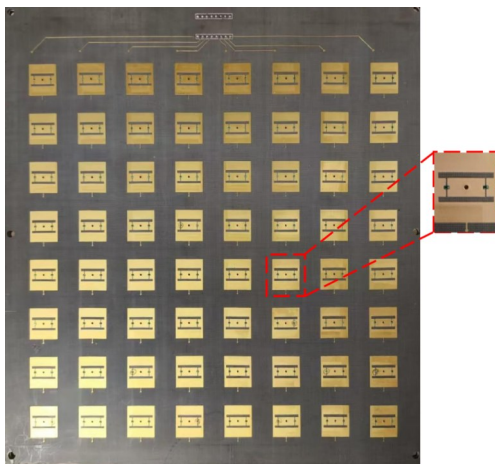


图7 低损耗1 bit透射式时域编码超表面样品

中式控制电路. 在电路实现上, DAC输出的初始电压信号首先通过同相运算放大器进行电压调制, 其输出电压 V_{out} 与输入电压 V_{in} 的关系可表示为

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \cdot V_{in} \quad (2)$$

其中, R_f 为反馈电阻, R_g 为输入端限流电阻. 通过调节 R_f/R_g 的比值, 将DAC输出的初始电压调制至 $\pm 1.7V$. 调制后的电压经由限流电阻驱动互补连接的PIN二极管对. 该电路可稳定输出 $\pm 1.7V$ 的偏置电压, 满足QPSK调制的实时性要求.

为验证该低损耗1 bit透射式智能超表面的实际性能, 我们在实际通信环境下对样品的电磁参数进行了测试, 测试结果如图9所示.

测试结果表明, 样品在4.9~5.57 GHz的工作频带内表现出良好的相位调控性能: 透射幅度优于-3 dB, 且2种状态间的相位差接近 180° , 在较宽频带范围内保持了稳定的透射幅度和相位特性.

对比实测结果与全波仿真可以发现, 两者在关键性能指标上总体吻合, 但存在以下可量化的差异: 在透射特性方面, 实测最低透射损耗为-1.02 dB (仿真值-0.54 dB), 差异为0.48 dB; 相位调控性能方面, 实测相位差为 $175.3^\circ \pm 3.8^\circ$ (仿真值 $178.5^\circ \pm 2.1^\circ$). 这些可能是加工过程中的阵面误差、工艺限制导致的单元一致性偏差, 以及超表面边缘效应和与周围环境的耦合效应等因素共同作用的结果. 需要强调的是, 这一微小差别并不会对基于该超表面的无线通信系统构建与实验产生巨大影响.

4 无线通信架构设计及实验测试

本文所设计的无线通信系统由发射端与接收端2个核心部分组成, 如图10所示. 在发射端, 系统由控制主机(PXIe-8881)、信号源(BF-M2015-AP)、馈源天线(XB-WDB2-10S)与前文所设计的透射式超表面组成. 其中, 控制主机承担了信息调制与信号生成等功能, 将待传输信息编码为二进制比特流, 生成相应的控制信号输出至超表面; 信号源负责生成5 GHz的载波信号, 并由馈源天线实现载波信号的辐射传输. 当编码控制

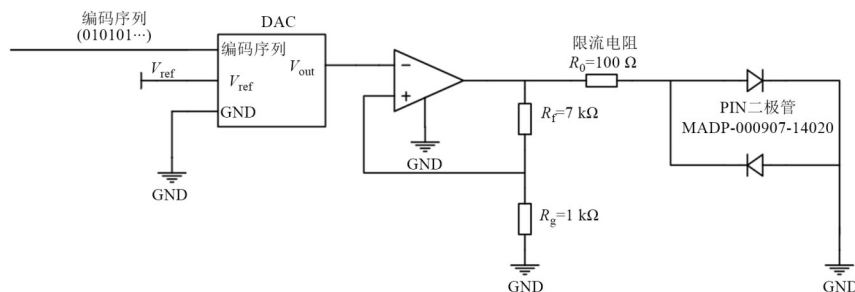


图8 低损耗1 bit透射式时域编码超表面控制电路

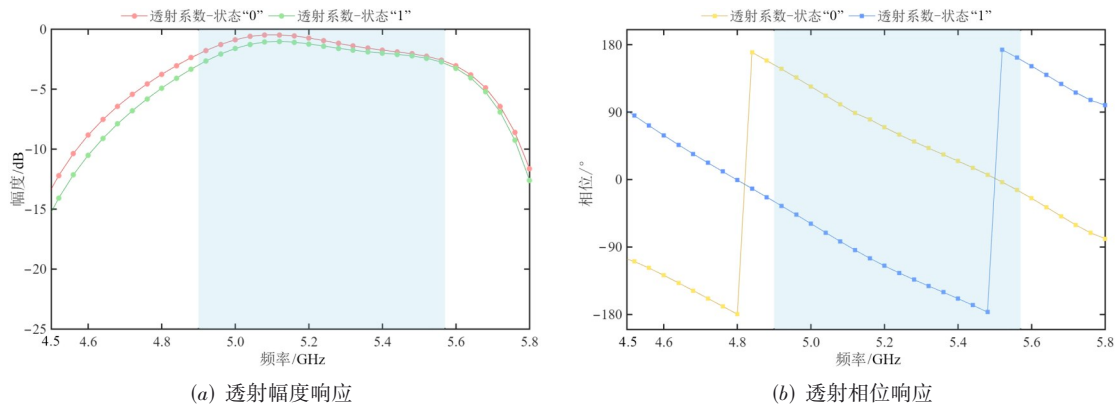


图9 1 bit透射超表面单元电磁参数实测结果

信号加载至超表面后,由馈源天线辐射的载波信号从其一侧垂直入射,经超表面完成相位调制后,从另一侧垂直出射.接收端由接收天线和软件无线电平台(USRP-2974)构成,其中接收天线负责捕获调制后的射频信号,并将其传输至USRP-2974进行后续处理;USRP-2974通过对接收信号进行下变频和傅里叶变换处理,提取信号频谱特征,解调并还原出原始信息.

本文设计的无线通信系统流程如图11所示,采用分层帧结构,由100符号的BPSK帧同步头(0101交替序列)、64符号QPSK导频序列、3840符号QPSK数据载荷以及16符号CRC校验字段组成.此外,发射端与接收端间通过直接连接的时钟线实现硬件同步,确保两端的时钟信号严格对齐.具体而言,发射端在发送数据前通过时钟线先发送同步信号,接收端接收该同步信号并根据其校准本地时钟频率,从而消除时钟漂移并

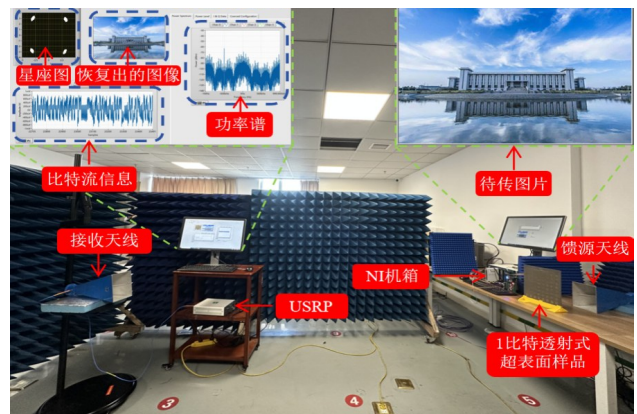


图10 实验场景图

实现收发同步.该架构设计实现了从信号发射、调制到接收、解调的完整通信链路,为后续系统性能测试提供了可靠的实验平台.

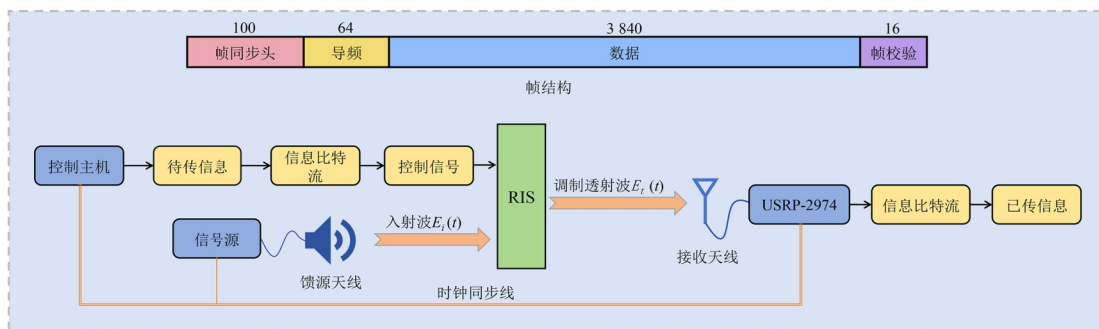


图11 系统流程框图

基于上述流程,为了测试该透射式时域编码超表面无线通信系统的性能,我们测试了在不同距离条件下和不同信号源功率条件下的信号功率谱及其星座图.其中表1详细列出了超表面阵列的实际测试收到的最大信号功率,图12和图13则分别展示了不同信号源功率和距离条件下的功率谱和星座图.从实测结果中可以发现,当信号源功率保持不变时,随着超表面与馈源天线距离的减小,信号的最大功率逐步提升,且星

表1 不同信号功率和距离条件下的接收端的信号最大功率

目标距离表面阵列距离/m	接收功率/dBm		
	信号源功率 0 dBm	信号源功率 -10 dBm	信号源功率 -20 dBm
1	-36.20	-45.51	-55.51
2	-39.58	-49.24	-59.42
3	-42.43	-52.73	-63.05

座点在 4 个正交相位点上的分布更加密集,表明信号传输更加的稳定.同时,当传输距离保持不变时,随着信号源功率增大,信号的最大功率逐步提升并呈现线性增长趋势,且星座点在 4 个正交相位点上的分布更加密集,表明信号传输信号强度与调制精度都在同步提升.

图 12 所示的功率谱密度分布中,各条垂线表征不

同频率点的实测功率值,单位为 dBm,其高度表示该频率点处的信号功率强度.原始信号经过下混频后中心频率搬移到-500 kHz,因此功率最高,对应图中最高谱线.特别地,图中 0 Hz 位置对应调制信号中心频点.图中黄色方框标记的区域为通信带宽,其频段范围为 5.000 25~5.000 75 GHz.

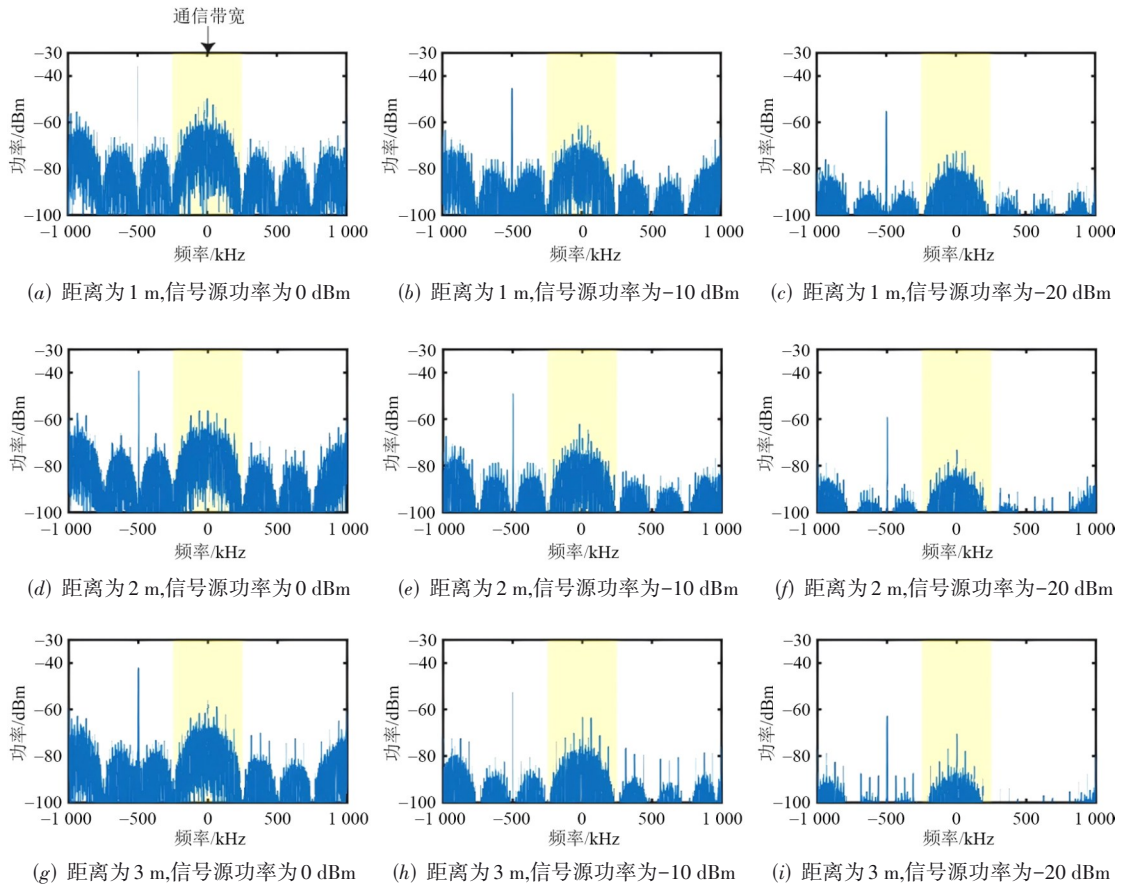


图 12 不同条件下实测接收端功率谱

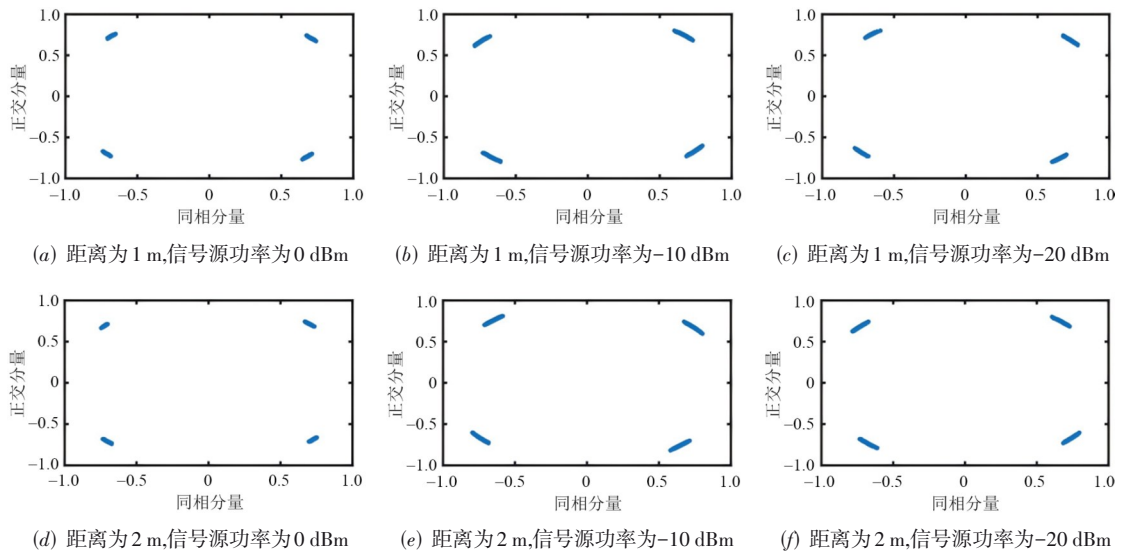
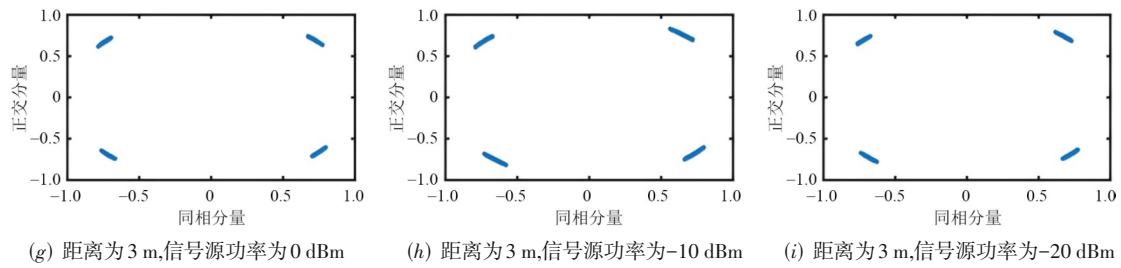


图 13 不同条件下实测接收端星座图



续图 13

进一步地,表2中将本文所构建的无线通信系统与相关研究进行了对比^[19-22],从中可以看出,本文提出的透射式时域编码超表面在低损耗方面表现优异;同时,基于此构建的无线通信系统原型具备空口实时视频传输能力.特别地,与文献[22]相比,本文设计的透射式超表面实现了 -0.54 dB的透射损耗,较文献[22]报道的 -1.00 dB有一定提升;同时,工作带宽从单频点扩展至 $4.75\sim 5.65$ GHz的宽频带范围,有效提升了系统的适用性.

表 2 与其他相关工作的透射性能对比表

参考文献	年份	最低透射损耗/dB	工作频率/GHz	是否进行通信实验	是否支持视频传输
文献[19]	2023	1.00	5.8	否	否
文献[20]	2023	1.24	23.3	否	否
文献[21]	2024	0.63	15.0	否	否
文献[22]	2024	1.00	5.7	否	否
本文工作	2025	0.54	5.0	是	是

5 结论

本文提出了一种基于时域编码的透射式超表面无线通信系统.通过设计工作频段为 $4.75\sim 5.65$ GHz的低损耗透射式超表面,结合时域编码技术实现了2 bit相位调制,成功构建了一套高效的QPSK无线通信系统.实验结果表明,该系统能够实现稳定且精确的信号传输,具有宽频带、低损耗、低成本等显著优势,为超表面技术在无线通信领域的发展,开拓了全新的思路,提供了新的应用途径,有望推动该领域实现新的突破与进展.

参考文献

- [1] 张子鉴. 5G毫米波多波束阵列射频模块的研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
ZHANG Z J. Research on RF Module for 5G Millimeter-Wave Multi-Beam Array[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [2] 童宣锋. 多频段多极化毫米波平面阵列天线关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [3] 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.
- [4] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 116753-116773.
- [5] 陈胜鑫, 何煦, 冯起, 等. 智能超表面辅助的雷达通信一体化系统恒模发射波形与无源波束形成联合设计[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(12): 2841-2857.
CHEN S Y, HE X, FENG Q, et al. Joint design of constant modular transmit waveform and passive beamforming for RIS-aided dual-functional radar and communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(12): 2841-2857. (in Chinese)
- [6] 王皓, 韦艳莎, 李鑫, 等. 基于超表面的高效大功率圆极化转换器设计[J/OL]. (2025-01-14) [2025-03-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GDZJ20250113007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
WANG H, WEI Y S, LI X, et al. Design of high-efficiency high-power circular polarization converter based on metasurface[J/OL]. (2025-01-14) [2025-03-10]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GDZJ20250113007&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [7] 梁凤凤, 刘秀红, 赵志, 等. 具有稳定强圆二色性的手性超表面传感器设计[J]. 光学学报, 2025, 45(8): 339-348.
LIANG F F, LIU X H, ZHAO Z, et al. Design of chiral metasurface sensor with stabilized strong circular dichroism[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(8): 339-348. (in Chinese)
- [8] 席延. 基于电磁超表面的雷达截面控制技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.
XI Y. Research on Radar Cross Section Control Technology Based on Electromagnetic Metasurface[D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (in Chinese)
- [9] 覃涛. 基于超表面微纳结构的视网膜成像显示技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [10] TONG X F. Research on The Key Technologies of Millimeter-Wave Multi-Band Multi-Polarized Planar Array Antennas[D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)

- QIN T. Research on Retinal Imaging Display Technology Based on Super-Surface Micro-Nano Structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)
- [10] 李赫. 基于可编程超表面技术的电磁探测与感知[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- LI H. Electromagnetic Detection and Sensing Based on Programmable Supersurface Technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)
- [11] LIU C, MA Q, LUO Z J, et al. A programmable diffractive deep neural network based on a digital-coding metasurface array[J]. Nature Electronics, 2022, 5(2): 113-122.
- [12] QIAN C, ZHENG B, SHEN Y C, et al. Deep-learning-enabled self-adaptive microwave cloak without human intervention[J]. Nature Photonics, 2020, 14(6): 383-390.
- [13] DAI J Y, TANG W K, WANG M T, et al. Simultaneous in situ direction finding and field manipulation based on space-time-coding digital metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(6): 4774-4783.
- [14] 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.
- [15] WANG S R, DAI J Y, ZHOU Q Y, et al. Manipulations of multi-frequency waves and signals via multi-partition asynchronous space-time-coding digital metasurface[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5377.
- [16] KE J C, CHEN X Y, TANG W K, et al. Space-frequency-polarization-division multiplexed wireless communication system using anisotropic space-time-coding digital metasurface[J]. National Science Review, 2022, 9(11): Nwac225.
- [17] 戴俊彦. 时域超表面理论研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- DAI J Y. Research and Application of Time-Domain Metasurface[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [18] 陈明正. 基于超表面的信息调制与信号处理研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- CHEN M Z. Research on Information Modulation and Signal Processing with Metasurfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [19] 肖强, 马骞, 宁玉鸣, 等. 基于 1 bit 透射超表面的可编程全息成像[C]//2023 年全国天线年会论文集(下). 北京: 中国电子学会, 2023: 628-630.
- XIAO Q, MA Q, NING Y M, et al. Programmable holographic imaging using 1 bit transmissive metasurface[C]//Proceedings of 2023 National Conference on Antennas (Vol.2). Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2023: 628-630.
- [20] 郭澈. 一种 Ka 波段 2 bit 透射超表面的设计与实现[D]. 深圳: 深圳大学, 2023.
- GUO C. Design and Implementation of a Ka-Band 2 Bit Transmission Supersurface[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2023. (in Chinese)
- [21] ZHANG P F, CHEN X W, ZHANG W M. Single-substrate transmissive antenna radiating arbitrary symmetric multi-beams based on coding metasurface[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2024, 23(2): 863-867.
- [22] NING Y M, MA Q, XIAO Q, et al. Reprogrammable non-linear transmission controls using an information metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2024, 12(3): 2301525.

作者简介



韩嘉宇 男, 2004 年出生于山西省. 东南大学信息科学与工程学院本科生. 主要研究方向为超表面无线通信系统.
E-mail: 213222131@seu.edu.cn



戴俊彦 男, 1991 年出生于江苏省. 东南大学信息科学与工程学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为超表面、可重构智能表面、时空调制技术和无线通信系统.
E-mail: junyand@seu.edu.cn



程强 男, 1979 年出生于安徽省. 东南大学信息科学与工程学院副教授、博士生导师. 主要研究方向为超材料设计理论及其应用. 中国电子学会会员编号: E190012797S.
E-mail: qiangcheng@seu.edu.cn