基于时空编码数字超表面的雷达散射截面积缩减及波达角估计方法

周群焰 王思然 戴俊彦* 程 强*
(东南大学毫米波全国重点实验室 南京 210000)

摘要：传统的波达角(DOA)估计方法的实现通常基于相控阵天线系统，而其高昂的硬件成本限制该技术在不同领域的应用和推广，此外相控阵天线普遍不具备隐身性能，其在工作频段内雷达散射截面积(RCS)普遍较高。为解决上述问题，该文在时空编码(STC)理论的基础上提出了一种基于超表面同时实现RCS缩减和DOA估计的方法，并利用一款毫米波超表面对算法进行了验证。实验结果表明，该方法实现的波达角估计误差在1°以内，同时RCS缩减大于10 dB，为DOA估计和RCS缩减功能的集成提供了全新的思路，具有高性能、低成本等特点。

关键词：波达角估计；雷达散射截面积缩减；时空编码数字超表面；毫米波；时空编码理论
中图分类号：TN820 **文献标识码**：A **文章编号**：2095-283X(2024)01-0150-10
DOI: 10.12000/JR23216

引用格式：周群焰, 王思然, 戴俊彦, 等. 基于时空编码数字超表面的雷达散射截面积缩减及波达角估计方法[J]. 雷达学报(中英文), 2024, 13(1): 150–159. doi: 10.12000/JR23216.

Reference format: ZHOU Qunyan, WANG Siran, DAI Junyan, *et al*. Simultaneous direction of arrival estimation and radar cross-section reduction based on space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Journal of Radars*, 2024, 13(1): 150–159. doi: 10.12000/JR23216.

Simultaneous Direction of Arrival Estimation and Radar Cross-section Reduction Based on Space-time-coding Digital Metasurfaces

ZHOU Qunyan WANG Siran DAI Junyan* CHENG Qiang*
(*State Key Laboratory of Millimeter Waves*, *Southeast University*, *Nanjing* 210000, *China*)

Abstract: The traditional Direction Of Arrival (DOA) estimation is typically based on phased array antenna systems. However, it is greatly limited by the high hardware cost for applications in various fields. In addition, conventional phased array antennas also suffer from the high Radar Cross-Section (RCS), which cannot be employed for stealth purposes. To address these issues, we propose a new algorithm based on the Space-Time-coding (STC) strategy for simultaneous DOA estimation and RCS reduction, which is further experimentally verified using a metasurface in the millimeter band. The results demonstrate the excellent performance of the

收稿日期：2023-11-13；改回日期：2023-12-26；网络出版：2024-01-04
*通信作者： 戴俊彦 junyand@seu.edu.cn； 程强 qiangcheng@seu.edu.cn
*Corresponding Authors: DAI Junyan, junyand@seu.edu.cn; CHENG Qiang, qiangcheng@seu.edu.cn
基金项目：国家重点研发计划(2023YFB3811502, 2018YFA0701904)，国家杰出青年科学基金项目(62225108)，国家自然科学基金(62288101, 62201139)，嵩山实验室项目纳入河南省重大科技专项管理体系）(221100211300-02, 221100211300-03)，“111”项目(111-2-05)，江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20212002)，中央高校基本科研业务费专项资金(2242022k6003)，东南大学-中国移动研究院联合创新中心项目(R202111101112JZC02)
Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2023YFB3811502, 2018YFA0701904), The National Science Foundation (NSFC) for Distinguished Young Scholars of China (62225108), The National Natural Science Foundation of China (62288101, 62201139), The Program of Song Shan Laboratory (Included in the Management of Major Science and Technology Program of Henan Province) (221100211300-02, 221100211300-03), The 111 Project (111-2-05), The Jiangsu Province Frontier Leading Technology Basic Research Project (BK20212002), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (2242022k6003), and The Southeast University-China Mobile Research Institute Joint Innovation Center (R202111101112JZC02)
责任主编：李廉林 Corresponding Editor: LI Lianlin

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

proposed DOA method with an error below 1°. Meanwhile, a good RCS reduction of over 10 dB is achieved in the bandwidth of interest. The proposed algorithm paves a new path to integrating DOA estimation and RCS reduction with a single metasurface, with the advantages of low cost and good performance.

Key words: Direction of arrival estimation; Radar cross section reduction; Space-time-coding digital metasurface; Millimeter wave; Space-time-coding theory

1　引言

波达角(Direction Of Arrival, DOA)估计作为雷达[1,2]和无线通信[3,4]领域的关键使能技术之一，一直受到专家学者的广泛关注。DOA估计旨在从传感器阵列的接收信号中确定不同方向信号源的波达角方向，进而实现目标定位和跟踪。随着阵列信号处理技术的发展，多重信号分类(MUltiple SIgnal Classification, MUSIC)[5]、旋转不变技术(Estimating Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)[6]、最大似然估计(Maximum Likelihood, ML)[7]等空间谱估计算法及其衍生算法的提出，大大提高了DOA估计系统的精确度，使其应用从传统雷达和通信系统延伸至自动驾驶[8,9]、智慧城市[10,11]、物联网[12,13]等新兴领域。目前大多数DOA估计方法的实现都依赖于相控阵系统，其硬件架构涉及大量的天线、射频前端和信号处理设备，这使得DOA估计技术的发展一直受到硬件复杂度、成本和功耗的限制。近年来，研究者提出了时间调制阵列天线技术[14–17]，并将其应用于DOA估计。时间调制阵列天线降低了DOA估计所需的硬件复杂度，增加了系统的自由度。然而，该方法往往面临低效率等困难，从而限制了它的应用场景。

超表面作为一种可定制电磁特性的人工电磁材料，能够灵活操控电磁波的振幅、相位和极化特性，被广泛应用于无线通信[18,19]、雷达[20,21]和微波成像[22,23]等领域。传统的超表面存在一个问题，即一旦制备完成，其功能通常是固定的，难以实时改变。为了解决这个问题，研究人员提出了数字编码和可编程超表面的概念[24]。通过添加可调元件(如PIN二极管、变容管等)到超表面单元中，超表面能够实时动态地实现不同功能，例如，极化调制[25,26]、幅度调制[27,28]、相位调制[29,30]和透射/反射控制[31,32]。这一概念将物理世界与数字信息相结合，为超表面技术带来了更大的灵活性和应用潜力。随着研究的不断深入，文献[33]将空间和时间数字编码相结合，提出了时空编码数字超表面的概念(Space-Time-Coding digital metasurface, STC digital metasurface)。通过精心设计时空编码矩阵，时空编码数字超表面可以灵活控制基波与谐波的幅度、相位和极化特性。时空编码数字超表面的提出将超表面的调控领域扩展到频域，为微波成像、无线通信和雷达等领域提供了新的可能性。在电磁环境复杂化，功能需求多样化的背景之下，基于多元信息的多功能集成超表面的提出极大地提高了超表面的功能集成度，为满足电磁器件集成化、系统小型化提供了新方案[34]。

近年来，得益于超表面低成本、易制备和灵活的电磁波操控能力，基于超表面的DOA估计得到了研究者的广泛关注[35–41]。文献[35]采用压缩感知(Compressed Sensing, CS)算法从超表面的随机散射模式中恢复DOA所需要的信息，并通过数值模拟和实验测量验证了该算法的可行性。此外，文献[36]演示了一种支持机器学习的超表面，通过复杂算法从大量数据中恢复DOA估计所需要的信息。文献[38]提出了一种基于时空调制超表面的DOA估计的方法，该方法从时空调制后的谐波信息中恢复出远场入射角度信息，将基于超表面的DOA估计方法扩展到频域。然而，上述基于超表面的DOA估计方法都只考虑了超表面DOA估计的能力，忽视了其在现实场景中的应用需求，例如在军事应用中，DOA估计系统应该尽可能不被探测到，这就需要其可以在保证DOA估计精度的同时尽可能地缩减其雷达散射截面积(Radar Cross-Section, RCS)。近年来，研究者提出了多种超表面实现RCS缩减的策略。Li等人[42]通过利用相位梯度超表面的表面波转换、偏转反射和漫反射特性，实现了高效的RCS缩减效果。Xu等人[43]提出了一种基于超薄抛物面超表面的双极化通道和多频通道漫反射隐身的方法，并验证了其多功能散射特性。Chen等人[44]提出了一种利用光学透明超表面实现偏振和角度不敏感的宽带单站和双站RCS降低的方法。上述方法RCS缩减性能优异，但无法同时实现DOA估计功能。

为此，本文提出了一种基于时空编码数字超表面同时实现RCS缩减和DOA估计的方法。通过精心设计时域中每列单元的编码序列，超表面可以同时在时域和频域对入射的电磁波进行调制。在时域上，通过调制DOA估计所需要的信息，实现DOA估计功能；在频域中，通过调制将基波能量分配到各个谐波上，实现RCS缩减的功能。本文利

用一款工作在毫米波频段的超表面实现了±60°范围内的DOA估计，误差小于1°。在30°和45°入射情况下，测试了在–30°观测方向上编码状态下的RCS缩减效果随频率变化的曲线。实验结果证明该方案可以实现大于10 dB的RCS缩减。

2 基于时空编码数字超表面的DOA估计理论

图1给出了基于时空编码数字超表面同时实现RCS缩减和DOA估计方法的示意图。基于现已发表的基于时间调制超表面DOA估计方法的研究[39]，对基于时空编码数字超表面的DOA估计理论展开如下分析：不失一般性，时空编码超表面可以被看作由集成了开关(PIN)二极管的单元组成的二维阵列。当外部数字控制信号控制单元加载的二极管在导通/关断状态间进行切换时，该时空编码超表面也会相应地在两种不同的电磁状态下切换。其中，两种状态在任意入射条件下都具有180°的相位差和均匀的反射幅度。假设超表面共有N列，每列单元共享相同的控制信号。

当空间中频率为f_c的电磁波从远场以入射角θ_i照射到超表面上时，在超表面法线方向接收到的反射信号可以表示为

$$E(t)=\sum_{n=1}^{N}\Gamma_n(t)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_c}(n-1)d\sin\theta_i} \tag{1}$$

其中，$\lambda_c=c/f_c$为入射波的波长，c是真空中的波速，$\Gamma_n(t)$为第n列单元的时变反射系数，d是每列单元之间的间距。当以T_c为采样间隔，从法线方向对反射信号进行N次采样后，采样的信号可以表示为

$$\vec{\boldsymbol{E}}=\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}\vec{\boldsymbol{A}} \tag{2}$$

其中，$\vec{\boldsymbol{E}}=\left[\begin{array}{cccc}E(T_c) & E(2T_c) & \cdots & E(NT_c)\end{array}\right]$是由$N$次采样信号组成的时间序列，$\vec{\boldsymbol{A}}=[1\ \ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_c}d\sin\theta_i}\ \cdots\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_c}(n-1)d\sin\theta_i}]$是远场入射波在每一列单元上激励的相位信息，$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$由不同列单元的时间调制序列在空间上组成的时空调制矩阵，可以进一步展开为

$$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}=\left[\begin{array}{cccc}\Gamma_1^{T_c} & \Gamma_2^{T_c} & \cdots & \Gamma_N^{T_c}\\ \Gamma_1^{2T_c} & \Gamma_2^{2T_c} & \cdots & \Gamma_N^{2T_c}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \Gamma_1^{NT_c} & \Gamma_2^{NT_c} & \cdots & \Gamma_N^{NT_c}\end{array}\right] \tag{3}$$

其中，$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$的行和列分别代表反射编码的空间和时间维度，即每行是相同时刻下超表面上不同列的反射系数，每列是超表面相同列在不同时刻下的反射系数。通过精心设计$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$，使其广义逆矩阵inv($\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$)存在，$\vec{\boldsymbol{A}}$可以表示为

$$\vec{\boldsymbol{A}}=\mathrm{inv}\left(\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}\right)\vec{\boldsymbol{E}} \tag{4}$$

令$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$由$N$阶哈达玛矩阵构成，即

$$\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}=\mathrm{Hadamard}(N) \tag{5}$$

其中，哈达玛矩阵(Hadamard)由+1和–1组成，且行与行(列与列)之间相互正交，满足逆矩阵inv($\widetilde{\boldsymbol{\Gamma}}$)存在的条件。式(4)中的$\vec{\boldsymbol{A}}$可以等效为空间谱估计中的接收信号矩阵。因此可以进一步通过MUSIC算法解得其空间谱，从而获取入射角度信息。

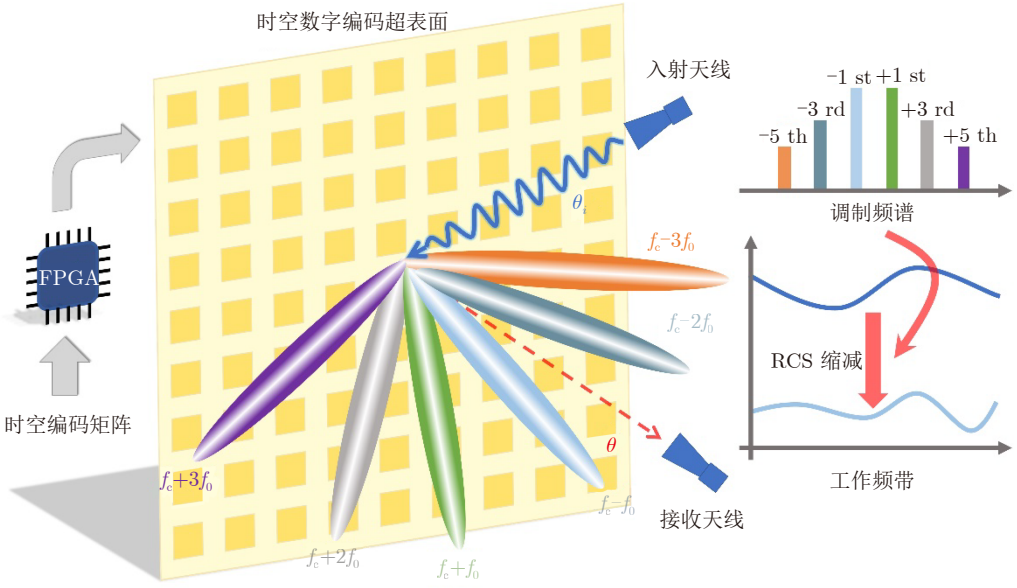


图 1 基于时空编码数字超表面同时实现RCS缩减和DOA估计方法的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DOA method based on STC digital metasurface with low RCS reduction

3　基于时空编码数字超表面的RCS缩减理论

由式(1)可知，超表面具有时变的反射系数。第n列的反射系数根据傅里叶级数可展开如下：

$$\Gamma_n(t)=\sum_{k=-\infty}^{+\infty}a_{k-n}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega_0 t} \tag{6}$$

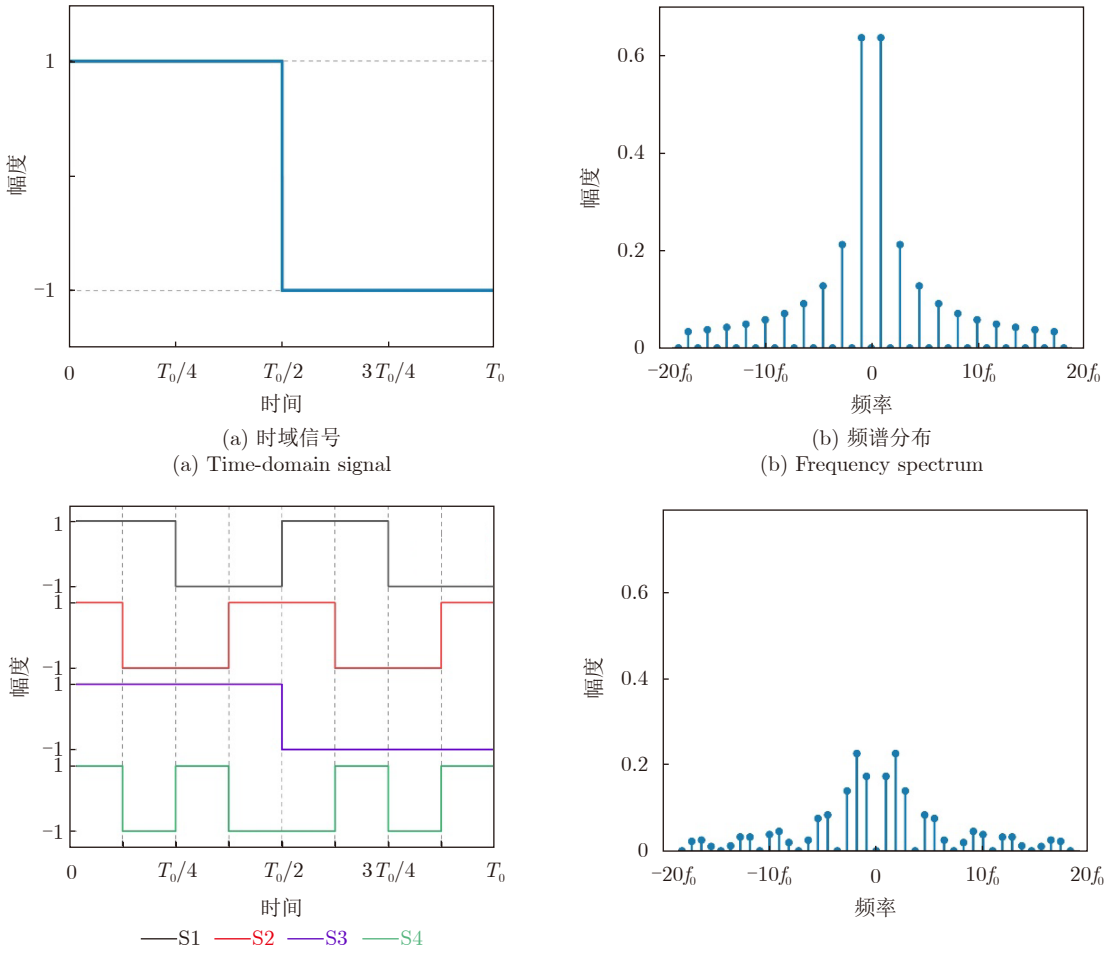
其中，$\omega_0=2\pi/T_0$是由编码序列周期$T_0=NT_c$决定的角频率，a_{k-n}是第n列时变反射系数产生的第k阶谐波对应的傅里叶级数系数。因此，当电磁波入射到时空编码数字超表面时，其从θ方向接收的反射电磁波可以写为

$$E(f,\theta)=\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=-\infty}^{+\infty}a_{k-n}\delta(f-kf_0-f_c)\cdot\mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda_c}(n-1)d(\sin\theta_i+\sin\theta)} \tag{7}$$

其中，a_{k-n}由$\Gamma_n(t)$决定。因此，通过精心设计$\Gamma_n(t)$，就能将入射能量分配到各个谐波上，实现对反射电磁波频谱的操控。这里，我们以周期单位脉冲信号S0为例(见图2(a))，当$\Gamma_n(t)$是占空比为M的周期单位脉冲信号时，其傅里叶级数系数可以表示为

$$a_{k-n}=\begin{cases}2M-1, & k=0\\ 2\cdot M\cdot Sa(k\pi M), & k=\pm1,\pm2,\pm3,\cdots\end{cases} \tag{8}$$

其中，当$M=1/2$时，$a_{0-n}=0$，即当$\Gamma_n(t)$为占空比1/2的方波时(如图2(a)所示)，入射电磁波经过超表面调制后，其能量将被全部分配到各个谐波分量上去，频谱如图2(b)所示。进一步地，考虑N=4时，对于式(3)中的时空调制矩阵$\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$，我们选取4列相互正交的时间反射序列S1—S4，如图2(c)所示。此时，这4个序列所构成的时空调制矩阵$\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$既满足式(4)的DOA估计理论需求，也满足式(8)中占空比$M=1/2$时的RCS缩减理论。通过数值仿真，可以



(a) 时域信号
(a) Time-domain signal

(b) 频谱分布
(b) Frequency spectrum

(c) 4种不同时空数字编码序列的时域信号
(c) Time-domain signals of four different STC sequences

(d) 4种不同时空数字编码序列对应的频谱分布
(d) Frequency spectrum of four different STC sequences

图 2 周期为T_0，占空比为50%的不同时空数字编码序列的时域信号和频谱分布

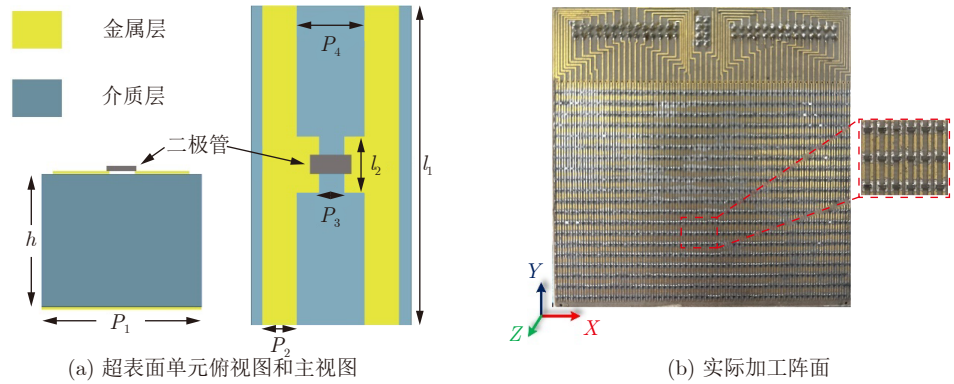
Fig. 2 Time-domain signals and frequency spectrums of different STC sequences with a duty cycle of 50% and a period of T_0

得到其频谱如图2(d)所示，其反射的电磁波中没有基波f_c的能量，即在该编码状态下成功实现了基波RCS能量的缩减。

综上所述，$\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$是时空编码数字超表面实现DOA估计和RCS缩减的共同决定性因素。在式(5)的基础上，选取阶数大于N的哈达玛矩阵中的非首行的其余行重新组成$\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$矩阵，使每行都有相同数量的+1和−1，且行与行之间相互正交。在此设计下，$\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}$同时满足式(4)和式(8)的条件，时空编码数字超表面可以同时实现DOA估计和RCS缩减。

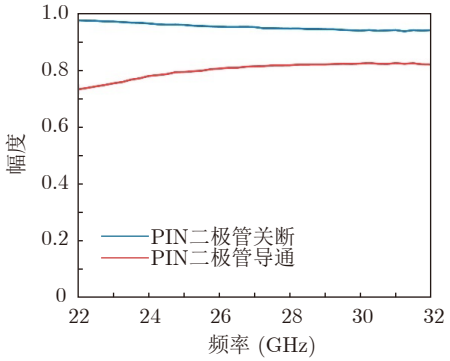
4 超表面单元设计与加工

为了验证所提出的基于时空编码数字超表面同时实现RCS缩减和DOA估计的方法，我们设计了一款工作在毫米波频段的1 bit时空编码数字超表面，其单元示意图如图3(a)所示。每一个超表面单元由两个矩形片组成，印刷在介电常数为1.96，损耗正切为0.002，厚度为$h=1.52$ mm的衬底(Rogers RT5880LZ)上。一个PIN二极管(MADP-000907-14020x)被加载在两个贴片之间，通过控制PIN二极管的导通/关断来控制超表面单元的编码状态。

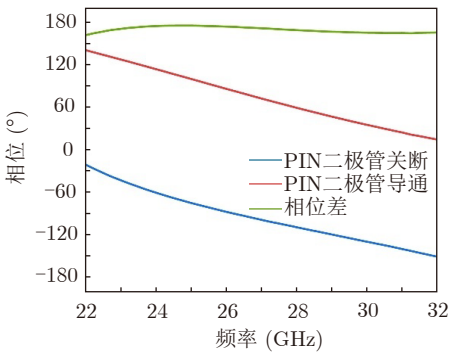


(a) 超表面单元俯视图和主视图
(a) Top and front view of the meta-atom

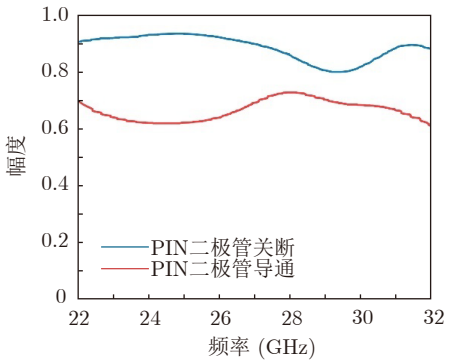
(b) 实际加工阵面
(b) Fabricated metasurface



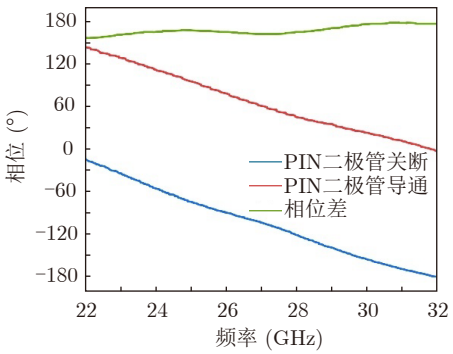
(c) 仿真单元反射幅度
(c) Simulation results of reflection amplitude



(d) 仿真单元反射相位
(d) Simulation results of reflection phase



(e) 实测阵面反射幅度
(e) Measured results of reflection amplitude of the metasurface



(f) 实测阵面反射相位
(f) Measured results of reflection phase of the metasurface

图 3 时空编码数字超表面单元、实物阵面、仿真和测试结果

Fig. 3 STC digital meta-atom, fabricated metasurface, simulated and measured results

单元的详细几何参数为$p_1=1.4$mm, $p_2=0.3$ mm, $p_3=0.3$ mm, $p_4=0.5$ mm, $l_1=2.8$ mm, $l_2=0.5$ mm。该超表面极化方式是线极化，极化方向是x方向。

在此结构基础上，利用商业仿真软件CST微波工作室对该单元进行了全波和电路联合仿真。在单元的x和y方向上，其边界条件为Unit Cell；在$\pm z$方向上，设置Floquet端口进行仿真。二极管等效串联电路参数如表1所示。在极化电场方向沿X轴的平面波入射下，其在二极管导通/关断状态下的反射幅度和相位响应曲线如图3(c)，图3(d)所示。22～32 GHz频段内，其仿真的反射幅度大于0.8，反射相位差在180°左右。通过改变平面波的入射角度，对该单元在10°, 20°, 30°, 40°, 50°和60°入射角下的单元反射特性进行了仿真，如图4(a)和图4(b)所示。

以此单元为基础，我们制备了由48 × 20个单元组成的数字时空编码超表面样品，如图3(b)所示。其中，每一列单元都连接在一起，通过偏置线共享一个共同的控制电压；同时，所有地(GND)线通过通孔连接到金属背板上；最后，信号线和地线集成到一个接口，该接口通过信号馈线连接到基于FPGA的控制平台上。实验利用自由空间法测试超表面的反射相位。喇叭天线与矢量网络分析仪相连，天线发射电磁波垂直入射到超表面样品上，并同时接收反射信号。喇叭天线与待测超表面的距离满足远场测试条件，其极化方向与超表面上二极管的放置方向保持平行。通过控制平台调节输出电压控制PIN二极管以获取导通/关断状态下的反射状态。另外，在测试时我们根据待测超表面的位置，在矢量网络分析仪的接收信号中设置了相应的时域门，以滤除环境噪声对测试结果的影响。图3(e)—图3(f)分别给出了该超表面在22～32 GHz频段内，PIN二极管关断/导通状态下实测反射幅度和相位响应曲线。结果表明，在不同编码状态下，超表面反射幅度大于0.6，两种状态的相位差在180°左右。对比全波仿真和实际测试结果发现，导通状态下实测的反射幅度损耗比仿真结果大，可能原因是阵面加工误差和二极管手工焊接导致单元一致性较差，以及部分单元未完全导通等。

表 1　二极管等效串连电路参数

Tab. 1　Equivalent serial circuit parameters of the PIN diode

状态	电流(mA)	电阻R (Ω)	电感L (nH)	电容C (pF)
关断	0	6.5	0	0.063
导通	15	4.6	0.204	0

5　实验验证

为了验证理论的实际应用效果，我们以上述的毫米波超表面为基础，搭建了测试环境，如图5所示。其中超表面固定在旋转平台上，通过信号馈线连接控制平台中的数字I/O模块(NI-6581b)及FPGA (PXIe-7966)模块。接收天线固定在其法向方向的延伸支架上，与超表面随旋转平台共同转动；远场发射天线固定在0°方向，发射27 GHz的单音信号到超表面上。通过控制旋转平台在–60°～60°角度区间内旋转，由接收天线收集经超表面调制后的反射信号，输入相应的信号处理模块，并采用所提方法获取其入射角度信息。图6(a)为–60°～60°的入射角度区间内，DOA估计值(红线)与实际值(蓝线)的对比；图6(b)为DOA估计结果与实际入射角度的绝对误差。从结果中可以看出，在整体测试区间内，DOA估计误差均小于1°。

为了验证其RCS缩减效果，我们在–30°观测方向上，测量了超表面在编码状态下不同频率的RCS缩减效果，如图6(c)和图6(d)所示。从30°和45°方向入射的电磁波经超表面调制后，能量被分配到了各个离散的谐波上，在观测频点接收到的超表面的

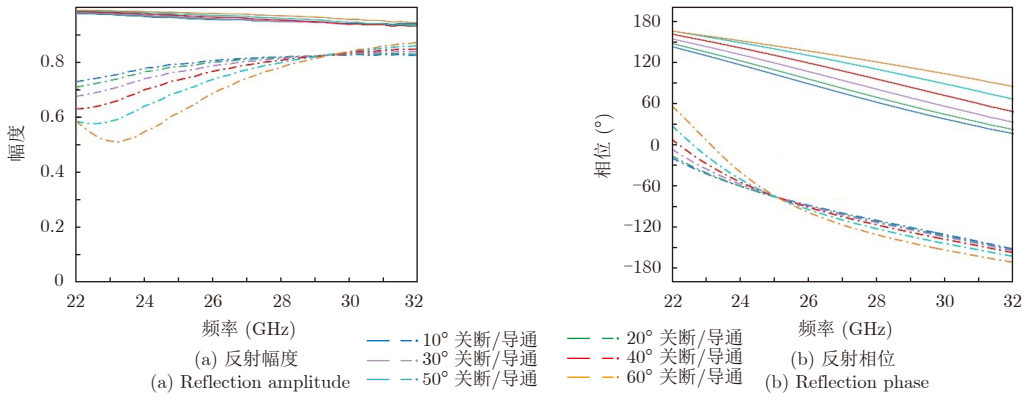


图 4 单元在不同斜入射角度情况下的仿真结果

Fig. 4 The simulated results of the meta-atom under different oblique incident angles

散射能量由此降低。实验结果表明，该时空编码数字超表面在双站情况下的部分频带内具有大于10 dB的RCS能力。由于其调制能力随入射角度变化，其RCS缩减效果会随着入射角增大而下降。

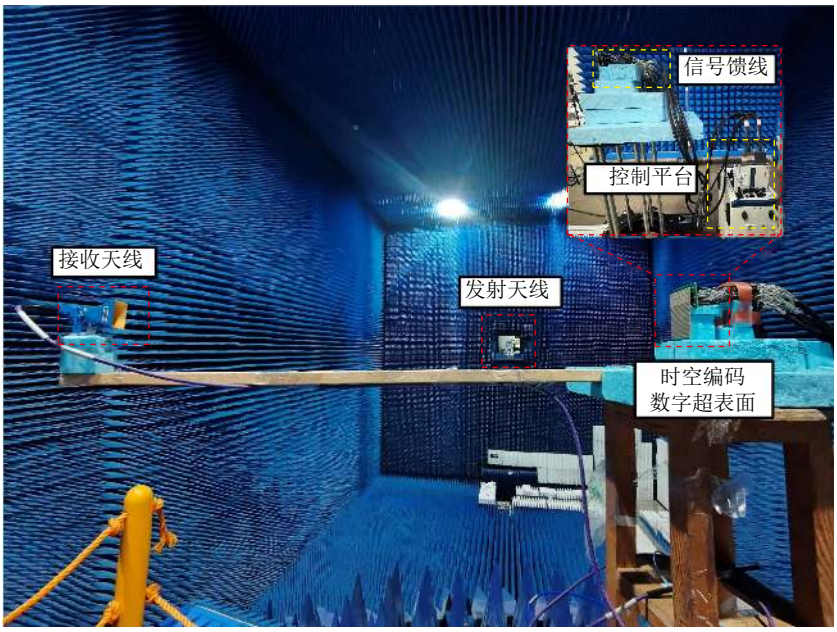
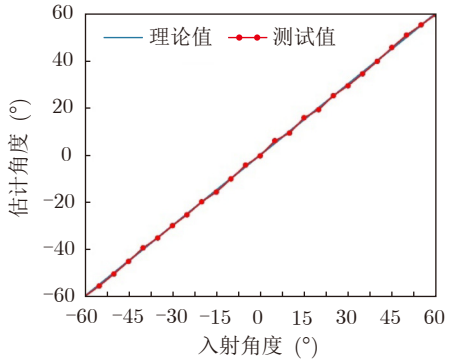


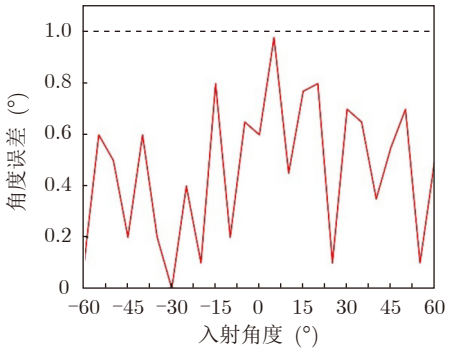
图 5 基于时空数字编码超表面同时实现RCS缩减和DOA估计的实验场景

Fig. 5 Experimental scenario of DOA estimation method with low RCS based on STC digital metasurface



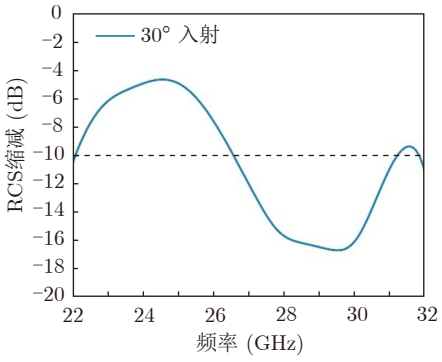
(a) DOA估计的理论值和实际测试值

(a) Theoretical and experimental values of DOA estimation



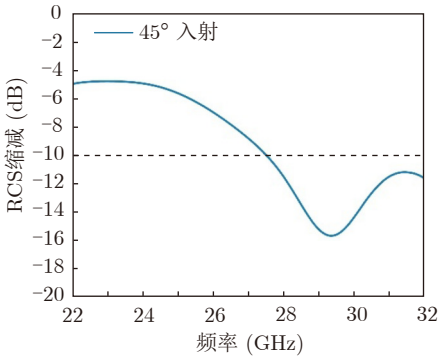
(b) DOA估计的角度绝对误差

(b) Absolute error of DOA estimation



(c) 30°入射，−30°方向观测的超表面RCS缩减随频率变化的曲线

(c) RCS reduction observed at −30° under 30° incidence



(d) 45°入射，−30°方向观测的超表面RCS缩减随频率变化的曲线

(d) RCS reduction observed at −30° under 45° incidence

图 6 DOA估计和RCS缩减测试结果

Fig. 6 The measured results of DOA estimation and RCS reduction

综上所述，该方法实现了基于时空编码数字超表面的同时雷达散射截面缩减和DOA估计，并在毫米波频段验证了该方法的可行性。与表2中基于超表面的其他DOA估计工作相比，我们的系统有着较大的角度估计范围和较高的估计精度，且在工作状态下具有一定的RCS缩减的能力。

表 2　不同基于超表面DOA估计方法的性能对比

Tab. 2　Performance comparison of metasurface-based DOA estimation in published works

相关文献	阵面规模	角度范围(°)	最大误差(°)	RCS缩减能力
文献[38]	10×10	–60～60	3.00	×
文献[39]	7×7	–60～60	3.58	×
文献[40]	20×20	–34～34	1.00	×
文献[41]	5×5	–40～40	0.31	×
本工作	48×20	–60～60	1.00	√

6　结语

本文提出了一种基于时空编码数字超表面同时实现DOA估计和RCS缩减的方法。为验证该方法的有效性，本文设计加工了一款工作在22～32 GHz的超表面，并基于其搭建了一套可以实现RCS缩减的DOA估计系统。实验结果表明，在保证RCS缩减的同时，系统在–60°～60°范围内，DOA估计误差小于1°；在双站条件下，超表面RCS可以实现大于10 dB的缩减。文中所提出的方法有望应用在隐身通信一体化领域，构建具有低RCS的高精度DOA系统。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

参 考 文 献

[1] BENCHEIKH M L, WANG Yide, and HE Hongyang. Polynomial root finding technique for joint DOA DOD estimation in bistatic MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(9): 2723–2730. doi: 10.1016/j.sigpro.2010.03.023.

[2] ENDER J H G. On compressive sensing applied to radar[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(5): 1402–1414. doi: 10.1016/j.sigpro.2009.11.009.

[3] HUANG Hongji, YANG Jie, HUANG Hao, *et al*. Deep learning for super-resolution channel estimation and DOA Estimation based massive MIMO system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(9): 8549–8560. doi: 10.1109/TVT.2018.2851783.

[4] PUCCI L, PAOLINI E, and GIORGETTI A. System-level analysis of joint sensing and communication based on 5G new radio[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2043–2055. doi: 10.1109/JSAC.2022.3155522.

[5] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276–280. doi: 10.1109/TAP.1986.1143830.

[6] ROY R and KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(7): 984–995. doi: 10.1109/29.32276.

[7] ZISKIND I and WAX M. Maximum likelihood localization of multiple sources by alternating projection[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36(10): 1553–1560. doi: 10.1109/29.7543.

[8] WANG Huafei, WAN Liangtian, DONG Mianxiong, *et al*. Assistant vehicle localization based on three collaborative base stations via SBL-based robust DOA estimation[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5766–5777. doi: 10.1109/JIOT.2019.2905788.

[9] WAN Liangtian, SUN Yuchen, SUN Lu, *et al*. Deep learning based autonomous vehicle super resolution DOA estimation for safety driving[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(7): 4301–4315. doi: 10.1109/TITS.2020.3009223.

[10] BURTOWY M, RZYMOWSKI M, and KULAS L. Low-profile ESPAR antenna for RSS-based DoA estimation in IoT applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 17403–17411. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2895740.

[11] WAN Liangtian, ZHANG Mingyue, SUN Lu, *et al*. Machine learning empowered IoT for intelligent vehicle location in smart cities[J]. *ACM Transactions on Internet Technology*, 2021, 21(3): 71. doi: 10.1145/3448612.

[12] AI Lingyu, JING Changqiang, CHEN Y, *et al*. Maximum likelihood estimators for three-dimensional rigid body localization in internet of things environments[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 201458–201467. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035850.

[13] MIAO Wang, LUO Chunbo, MIN Geyong, *et al*. Location-based robust beamforming design for cellular-enabled UAV communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(12): 9934–9944. doi: 10.1109/JIOT.2020.3028853.

[14] TENNANT A and CHAMBERS B. A two-element time-modulated array with direction-finding properties[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2007, 6: 64–65. doi: 10.1109/LAWP.2007.891953.

[15] HE Chong, LIANG Xianling, LI Zhaojin, *et al*. Direction finding by time-modulated array with harmonic characteristic analysis[J]. *IEEE Antennas and Wireless*

Propagation Letters, 2015, 14: 642–645. doi: 10.1109/LAWP.2014.2373432.

[16] CHEN Jingfeng, HE Chong, LIANG Xianling, *et al*. Direction finding of linear frequency modulation signal in time modulated array with pulse compression[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(1): 509–520. doi: 10.1109/TAP.2019.2938815.

[17] LI Gang, YANG Shiwen, and NIE Zaiping. Direction of arrival estimation in time modulated linear arrays with unidirectional phase center motion[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(4): 1105–1111. doi: 10.1109/TAP.2010.2041313.

[18] LAN Jifeng, SANG Jian, ZHOU Mingyong, *et al*. Measurement and characteristic analysis of RIS-assisted wireless communication channels in Sub-6 GHz outdoor scenarios[C]. 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring), Florence, Italy, 2023: 1–6. doi: 10.1109/VTC2023-Spring57618.2023.10200072.

[19] TANG Wankai, CHEN Mingzheng, CHEN Xiangyu, *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. doi: 10.1109/TWC.2020.3024887.

[20] WANG Siran, CHEN Mingzheng, KE Junchen, *et al*. Asynchronous space-time-coding digital metasurface[J]. *Advanced Science*, 2022, 9(24): 2200106. doi: 10.1002/advs.202200106.

[21] KE Junchen, DAI Junyan, ZHANG Junwei, *et al*. Frequency-modulated continuous waves controlled by space-time-coding metasurface with nonlinearly periodic phases[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 273. doi: 10.1038/s41377-022-00973-8.

[22] LI Lianlin, CUI Tiejun, JI Wei, *et al*. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 197. doi: 10.1038/s41467-017-00164-9.

[23] WU Junwei, WANG Zhengxing, ZHANG Lei, *et al*. Anisotropic metasurface holography in 3-D space with high resolution and efficiency[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 302–316. doi: 10.1109/TAP.2020.3008659.

[24] CUI Tiejun, QI Meiqing, WAN Xiang, *et al*. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e218. doi: 10.1038/lsa.2014.99.

[25] KE Junchen, CHEN Xiangyu, TANG Wankai, *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. doi: 10.1093/nsr/nwac225.

[26] GAO Xi, YANG Wanli, MA Huifeng, *et al*. A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(11): 6086–6095. doi: 10.1109/TAP.2018.2866636.

[27] HUANG Cheng, LIAO Jianming, JI Chen, *et al*. Graphene-integrated reconfigurable metasurface for independent manipulation of reflection magnitude and phase[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(7): 2001950. doi: 10.1002/adom.202001950.

[28] PHON R and LIM S. Dynamically self-reconfigurable multifunctional all-passive metasurface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(37): 42393–42402. doi: 10.1021/acsami.0c12203.

[29] LIU Lixiang, ZHANG Xueqian, KENNEY M, *et al*. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(29): 5031–5036. doi: 10.1002/adma.201401484.

[30] ZHANG Lei, WANG Zhengxing, SHAO Ruiwen, *et al*. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(4): 2984–2992. doi: 10.1109/TAP.2019.2955219.

[31] CLEMENTE A, DUSSOPT L, SAULEAU R, *et al*. Wideband 400-element electronically reconfigurable transmitarray in X band[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(10): 5017–5027. doi: 10.1109/TAP.2013.2271493.

[32] LI Weihan, QIU Tianshuo, WANG Jiafu, *et al*. Programmable coding metasurface reflector for reconfigurable multibeam antenna application[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, 69(1): 296–301. doi: 10.1109/TAP.2020.3010801.

[33] ZHANG Lei, CHEN Xiaoqing, LIU Shuo, *et al*. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4334. doi: 10.1038/s41467-018-06802-0.

[34] 许河秀, 王彦朝, 王朝辉, 等. 基于多元信息的多功能电磁集成超表面研究进展[J]. 雷达学报, 2021, 10(2): 191–205. doi: 10.12000/JR21037.

XU Hexiu, WANG Yanzhao, WANG Chaohui, *et al*. Research progress of multifunctional metasurfaces based on the multiplexing concept[J]. *Journal of Radars*, 2021, 10(2): 191–205. doi: 10.12000/JR21037.

[35] LIN Mingtuan, XU Ming, WAN Xiang, *et al*. Single sensor to estimate DOA with programmable metasurface[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(12): 10187–10197. doi: 10.1109/JIOT.2021.3051014.

[36] HUANG Min, ZHENG Bin, CAI Tong, *et al*. Machine-learning-enabled metasurface for direction of arrival estimation[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(9): 2001–2010. doi: 10.1515/nanoph-2021-0663.

[37] CHEN Xiaoqing, ZHANG Lei, LIU Shuo, *et al*. Artificial neural network for direction-of-arrival estimation and secure wireless communications via space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(23): 2201900. doi: 10.1002/adom.202201900.

[38] DAI Junyan, TANG Wankai, WANG Manting, *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. doi: 10.1109/TAP.2022.3145445.

[39] ZHOU Qunyan, WU Junwei, WANG Siran, *et al*. Two-dimensional direction-of-arrival estimation based on time-domain-coding digital metasurface[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121(18): 181702. doi: 10.1063/5.0124291.

[40] WANG Jiawei, HUANG Ziai, XIAO Qiang, *et al*. High-precision direction-of-arrival estimations using digital programmable metasurface[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2022, 4(4): 2100164. doi: 10.1002/aisy.202100164.

[41] XIA Dexiao, WANG Xin, HAN Jiaqi, *et al*. Accurate 2-D DoA estimation based on active metasurface with nonuniformly periodic time modulation[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2023, 71(8): 3424–3435. doi: 10.1109/TMTT.2022.3222322.

[42] LI Yongfeng, ZHANG Jieqiu, QU Shaobo, *et al*. Wideband radar cross section reduction using two-dimensional phase gradient metasurfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(22): 221110. doi: 10.1063/1.4881935.

[43] XU Hexiu, ZHANG Lei, KIM Y, *et al*. Wavenumber-splitting metasurfaces achieve multichannel diffusive invisibility[J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(10): 1800010. doi: 10.1002/adom.201800010.

[44] CHEN Ke, GUO Wenlong, DING Guowen, *et al*. Binary geometric phase metasurface for ultra-wideband microwave diffuse scatterings with optical transparency[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12638–12649. doi: 10.1364/OE.392182.

作 者 简 介

周群焰，博士生，主要研究方向为超表面、可重构智能超表面、时空调制技术和无线通信系统。

王思然，博士生，主要研究方向为信息超材料及其在雷达、目标特性和无线通信中的应用。

戴俊彦，博士，副研究员，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。

程　强，博士，教授，主要研究方向为超材料设计理论及其应用。

(责任编辑：于青)