



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

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



Research
Metamaterials—Article

基于语音识别的电磁调控智能超表面

柏林^{a,#}, 刘元可^{a,#}, 徐亮^a, 张政^a, 王强^a, 蒋卫祥^{a,b,*}, 仇成伟^{c,*}, 崔铁军^{a,*}

^a State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China

^b Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

^c Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117583, Singapore

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 December 2021

Revised 17 April 2022

Accepted 29 June 2022

Available online 20 January 2023

关键词

语音识别

可编程超表面

遗传算法

智能电磁调控

摘要

本研究提出并实现了一种基于人类语音识别的智能超表面平台,用于对电磁波束进行可编程调控。该智能超表面平台由数字编码超表面、语音识别模块、单片机和数模转换器(DAC)电路组成,可根据预先存储的语音指令对电磁波进行智能控制。所构建的数字编码超表面包含 6×6 个超级子单元,每个超级子单元由 4×4 个嵌入了变容二极管的有源数字单元组成。语音识别模块配合DAC和单片机对语音指令进行识别,并生成对应的电压序列来控制超表面。此外,在超表面的设计过程中引入遗传算法,可有效优化超表面相位分布。为了验证智能超表面平台的性能,实验展示了雷达散射截面面积缩减、涡旋波束生成和波束分裂三种典型功能。所提出的方案为调控电磁波提供了一种新途径,并在电磁和声学通信之间架起了一座桥梁。

© 2023 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

在过去的十多年中,超表面因其卓越的波束操控能力受到了广泛关注[1–5]。超表面是一种由周期或非周期的亚波长单元组成的二维人工结构,与传统的三维超材料相比,具有超薄、低损耗、易于集成等优点。然而,对于无源超表面,它们的功能一旦加工完成就无法改变。

有源超表面的出现使得对电磁波可调控的研究显著增加。到目前为止,已经提出并研究了有关二极管[6–9]、石墨烯[10–11]、相变材料[12]和透明导电氧化物[13]的有源超表面。得益于有源超表面灵活的可调特性,手性超表

面的非对称传输可动态调控[6],基于超表面的Fabry-Pérot谐振腔天线可调节其工作频率和辐射角度[7]。此外,可重构超表面能够在几种显著不同的功能之间切换并产生复杂波束。Li等[8]提出了一种有源超表面,可以将反射波束的数量从1连续调整到5。文献[9]通过在超表面上嵌入变容二极管的方式,实现了在线极化、椭圆极化和圆极化之间动态切换的极化转换器。

为了实现更多不同功能的实时调控与切换,Cui等[14]于2014年提出了数字编码和可编程超表面,从数字编码角度表征超表面,在超表面与信息科学之间建立了关联。通过对“0”和“1”的编码序列进行排列组合,单元

* Corresponding authors.

E-mail addresses: wxjiang81@seu.edu.cn (W.X. Jiang), chengwei.qiu@nus.edu.sg (C.-W. Qiu), tjcui@seu.edu.cn (T.J. Cui).

These authors contributed equally to this work.

独立可调的可编程超表面能够实现更先进、更实用的功能器件[15–16]。最近，人们尝试利用光控[17–18]和温控[19–20]的方式构建数字和可编程超表面。信息技术的快速发展促进了多学科的融合，文献[21–22]将超表面与视觉、运动结合起来。事实上声音也具有传递信息的能力，将语音识别模块集成到可编程超表面，可以把语音信号与电磁信号连接在一起，未来有望在智能通信、人机交互、智慧城市等领域获得广泛应用。

本文提出、设计并验证了一种基于语音识别的可编程电磁调控数字超表面。通过实时改变语音指令，可以在无接触的情况下实现不同种类的功能。此外，本文采用遗传算法（GA）辅助超表面的设计，根据不同的功能优化得到对应的编码序列。作为理论验证，展示了三种不同的代表功能，包括雷达散射截面（RCS）缩减、涡旋波束生成和波束分裂。测试和仿真结果验证了智能超表面系统的良好性能。这项作为基于智能超表面控制电磁波束提供了一种语音识别的新方法。

2. 语音识别智能超表面的工作原理

本文所提出的基于语音识别智能超表面平台由数字超表面、数模转换器（DAC）电路、单片机和语音控制模块组成，如图1所示。为了实现智能超表面，在每个单元结构上嵌入变容二极管，构成一个有源数字单元。通过调节加载在变容二极管两端的偏置电压，有源数字单元的反射相位响应可以动态调节。一个超级子单元中的所有有源数字单元共享同一个反向偏置电压，并且每个超级子单元的偏置电压都是可以独立控制的。外接的语音控制系统由三部分组成：语音控制模块、单片机和DAC。当人们发出语音指令时，语音识别模块对该命令进行识别，单片机根据相应的串口数据计算偏置电压序列，并将数据转换成DAC所需的格式发送到DAC。然后DAC根据从单片机接收到的数据生成超表面所需的电压分布。经过上述一系列过程，便可实现通过语音指令来操控电磁波束的可编程超表面。

为了构建一个2比特数字超表面，首先设计了一个反射状态可以被动态控制的有源数字单元，如图2（a）所示。所设计的单元由两层金属结构和一层介质基板组成。其中上表面有一对交叉指形的金属贴片，在两个贴片之间的缝隙处嵌入了一个变容二极管。中间层为介质基板F4B（介电常数2.65，损耗角正切0.001），下表面覆盖了一层铜板作为金属地。上层每个金属贴片的上下两端都放置了直流偏置线，用来连接同一列相邻的两个有源数字单元。

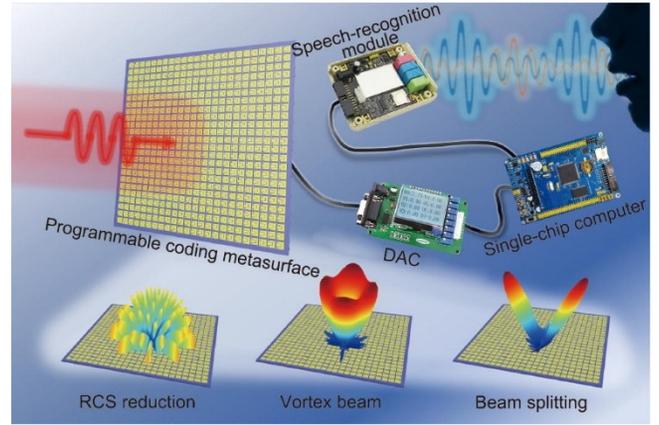


图1. 用于可编程电磁调控的语音识别数字超表面示意图。

直流偏置电压可以通过偏置线加载到变容二极管两端并改变它们的电容值。因此，当调节直流偏置电压时，有源数字单元在不同的电容值下表现出不同的反射状态。有源数字单元的周期尺寸为 $L = 12 \text{ mm}$ （约 $\lambda/4.2$ ），介质基板高度为 $H = 3 \text{ mm}$ （约 $\lambda/16.7$ ），金属铜的厚度为 0.018 mm 。利用仿真软件进行优化后，其他几个几何尺寸[图2（a）]设置为： $a = 0.9 \text{ mm}$ 、 $b = 6.5 \text{ mm}$ 、 $c = 3.3 \text{ mm}$ 、 $d = 0.7 \text{ mm}$ 、 $e = 4.3 \text{ mm}$ 、 $f = 8.4 \text{ mm}$ 、 $g = 2.5 \text{ mm}$ 、 $i = 1 \text{ mm}$ 、 $t = 0.2 \text{ mm}$ 。

为了实现更广的相位覆盖范围和更宽的工作带宽，选择一个低电容值、高电容比和低损耗的变容二极管是单元设计的关键。本文选择了MACOM科技公司型号为“MA46H120”的变容二极管[23]。图2（b）为该变容二极管的等效电阻-电感-电容（RLC）串联电路，其等效参数选取如下：串联电阻 R_s 为 0.88Ω ；寄生电感 L_s 为 0.4 nH ；当反向偏置电压从 0 V 变化到 10 V 时，对应的可变电容 C_T 从 1.1 pF 变化到 0.14 pF 。在设计过程中还考虑了金属贴片之间尺寸为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的焊盘对单元反射系数的影响。

为了研究所设计单元的反射特性，在CST Microwave Studio软件中进行了数值仿真。图2（c）和（d）绘制了有源数字单元在不同 C_T 值下仿真得到的反射幅度和反射相位。黄色区域表示在 $4.74 \sim 8.48 \text{ GHz}$ 范围内，单元的反射幅度均大于 -1.5 dB ，反射相位的变化范围为 $250^\circ \sim 306.4^\circ$ 。在这个工作带宽内，该单元可以有效工作，说明所设计的有源数字单元具有宽带、高反射率、宽相位覆盖范围等显著优势。特别地，在频率为 6 GHz 时， C_T 分别取值为 1.10 pF 、 0.45 pF 、 0.32 pF 和 0.14 pF 四种情况下的相位差约为 90° ，对应的反向偏置电压分别为 0 V 、 3.0 V 、 4.8 V 和 10.0 V 。由此，设计得到了一个2比特有源数字单元，这四种反射状态分别用编码“00”“01”“10”“11”

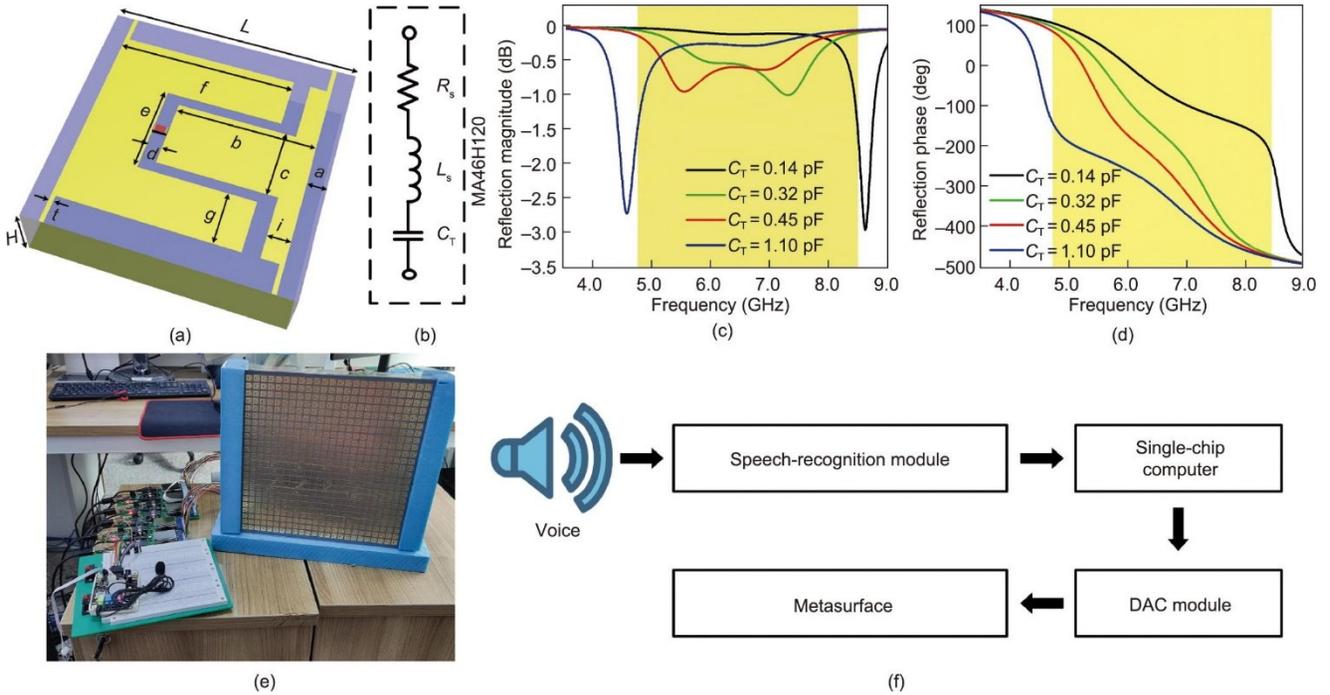


图2. 所设计的智能超表面及其反射特性。(a) 有源数字单元的结构；(b) 型号为“MA46H120”的变容二极管的等效电阻-电感-电容（RLC）串联电路；(c) 不同 C_r 值下单元的仿真反射幅度；(d) 不同 C_r 值下单元的仿真反射相位；(e) 加工制作的语音识别数字超表面照片；(f) 声控系统架构及其操作流程。

来表示。通过改变反向电压，所提出的单元可以在工作带宽内实现2比特编码所需的相移。

接着，用 4×4 个单元组成一个超级子单元，来减小相邻单元之间相位突变的影响。16个单元的左、右偏置线分别连接在一起，因此，同一个超级子单元中的所有有源数字单元共享同一个反向偏置电压。所有超级子单元的正负极通过金属通孔转移到超表面的背面。作为实验验证，制作了一个包含 6×6 个超级子单元的数字超表面，如图2(e)所示，每个超级单元都可以独立控制。

实现语音控制可编程超表面的关键是根据不同的语音命令产生不同的电压序列，使可编程超表面呈现不同的编码状态，实现各种不同功能。语音控制系统框架如图2(f)所示。选用型号为REC-V2的语音识别模块来识别语音指令。这是一款高性能的语音用户界面，可实现人机语音交互。该语音识别模块可以储存多达50条不同的语音指令，在信噪比大于30 dB时可识别6 m以内的语音指令，识别率为97%，响应时间小于0.5 s。该模块方便设计各种人机交互产品，承担识别语音指令的作用，并在识别后将对应的串口数据发送给单片机。值得注意的是，不同语音信号的发音在时域上表现出不同的波形，语音识别模块是通过波形进行采样来实现语音识别的。不同人对同一个语句的发音，在时域上对应的波形几乎是相同的，因此，该语音识别模块适用于所有用户。

单片机根据接收到的串口数据计算偏置电压分布，并将通道号和对应的电压值转换成所需的格式发送给DAC模块。数据传输方式为串口通信，波特率为9600 B。DAC模块根据接收到的数据生成超表面所需的偏置电压序列，成功实现声控超表面。选用的DAC模块是基于TLC5628 DAC板，每个DAC模块有8个独立的电压输出通道，能够产生0~10 V精度为0.01 V的直流电压。所设计的超表面由 6×6 个超级子单元组成，因此需要5个DAC电路板。图2(e)展示了语音控制系统和其他元件照片。为了清楚地演示语音控制系统的操作过程，制作了一个短视频，详见附录A，其中的具体细节，有兴趣的读者可参阅附录A第S1小节。36个通道产生的偏置电压清楚地显示在DAC的屏幕上。可以看到，预先存储的电压序列随着语音命令的变化而相应变化。这个DAC最大只能显示9.99 V。为了保证控制电压的准确性，在视频中用万用表测量了电压值，良好的一致性表明了该DAC的有效性。

3. 功能验证和仿真结果

给出了三种功能来验证上述智能超表面的性能。在超表面设计中合理利用优化算法，可以大大缩短设计时间、提高设计效率。在这项工作中，为了高效设计超表面，引

入遗传算法, 根据指定功能辅助寻找最优编码序列。遗传算法是一种模拟达尔文生物进化自然选择和遗传机制的随机全局搜索算法, 在求解复杂组合优化问题时, 能有效地搜索出最优解[19–21]。优化中适应度函数定义如下:

$$\min F = \sum |f(\theta, \varphi) - f_g(\theta, \varphi)| \quad (1)$$

式中, θ 和 φ 分别为方向图的俯仰角和方位角; $f(\theta, \varphi)$ 为超表面的远场方向图; $f_g(\theta, \varphi)$ 为优化目标的远场方向图。超表面的远场散射方向图可以表示为:

$$f(\theta, \varphi) = \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^n E_{pq}(\theta, \varphi) \exp \left\{ jk \left[\left(p - \frac{1}{2} \right) d_x \sin \theta \cos \varphi + \left(q - \frac{1}{2} \right) d_y \sin \theta \sin \varphi \right] \right\} \quad (2)$$

式中, p 和 q 分别为 x 方向和 y 方向的单元序号; $E_{pq}(\theta, \varphi)$ 为第 q 行第 p 列单元的远场方向图; j 为虚数单位; k 为波数; d_x 和 d_y 分别为单元在 x 方向和 y 方向的尺寸。幅度和相位信息都将代入远场方向图的计算当中。终止条件为迭代次数达到 500 次或者达到优化目标。因此, 遗传算法将持续寻找优化的参数分布, 直到满足终止条件。

为了验证遗传算法在超表面设计中的可行性, 使用遗传算法来优化 RCS 缩减功能。经过精心设计的编码超表面能够使入射波的能量被随机打散到各个方向[24–27]。在这种情况下, 优化目标是使入射波均匀地反射到各个方向。适应度值达到稳定后的最终优化编码序列如图 3 (a) 所示, 仿真得到 6 GHz 时三维远场方向图如图 3 (b) 所示。可以观察到, 反射波的主波束消失, 各个方向上的散射能量都相对较小。在 5.3~7.7 GHz 的宽频段内, 在 2 比特电容值不变的情况下, 都具有较好的 RCS 缩减效果; 也就是说, 只使用了四种编码状态, 而不是连续的相位分布。

为了进一步验证可编程超表面性能, 展示了第二种功能——涡旋波束生成。涡旋波束携带螺旋相位分布的轨道角动量 (OAM)。理论上, 不同模式的 OAM 波束具有正交性, 可以避免相互干扰, 在信号传输过程中各个模式的相位分布能够保持稳定。也就是说, 利用 OAM 波束携带微波信号就可以实现无限多通信信道和信道容量, 使传输速率得到显著提高[28–31]。

正一阶和正二阶涡旋波的离散化相位分布分别如图 3 (c) 和 (d) 所示, 在 6 GHz 下的三维远场方向图如图 3 (e) 和 (f) 所示。可以清楚地观察到, 每个方向图的中间都有一个空心环, 正二阶涡旋波的圆环要略大于正一阶, 这符合涡旋波的特性。近场相位分布也是表征涡旋波性能的一个重要指标。图 3 (g) 和 (h) 给出了正一阶和

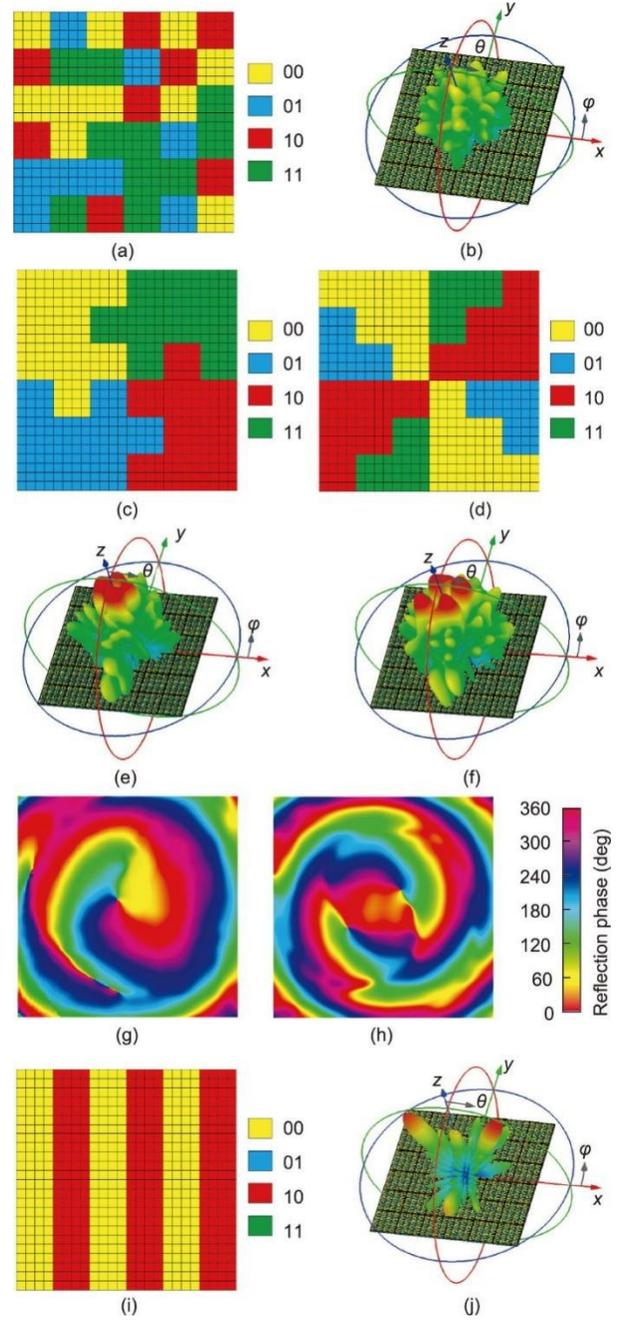


图 3. 可编程超表面的编码图案及仿真结果。RCS 缩减编码图案 (a) 和 6 GHz 时仿真得到的三维远场方向图 (b); 正一阶涡旋波束 (c) 和正二阶涡旋波束 (d) 的编码图案; 正一阶涡旋波束 (e) 和正二阶涡旋波束 (f) 在 6 GHz 时仿真得到的三维远场方向图; 正一阶涡旋波束 (g) 和正二阶涡旋波束 (h) 在 6 GHz 时仿真得到的 E_x 电场分量在 xoy 平面上的相位分布; 波束分裂的编码图案 (i) 和 6 GHz 时仿真得到的三维远场方向图 (j)。

正二阶涡旋波在 xoy 平面仿真得到的 E_x 电场分量相位分布。在观测平面上可以清晰地观察到一圈和两圈螺旋形渐变的相位分布。

第三个讨论的功能是波束分裂。为了简单起见, 设计了产生两个对称波束的编码序列。偏折角 α 应满足以下公式:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\lambda \cdot d\varphi}{2\pi \cdot \Gamma_x}\right) \quad (3)$$

式中, λ 为工作波长; $d\varphi$ 为相邻超级子单元的相位差; Γ_x 为超级子单元在 x 方向上的周期尺寸。在设计中, 工作频率为 6 GHz, 波长 λ 为 50 mm, $d\varphi$ 为 $\pm\pi$, Γ_x 为 48 mm, 因此计算得到的偏转角 α 为 $\pm 31.4^\circ$ 。仿真得到的三维远场方向图如图 3 (j) 所示, 可以看到 xoz 平面上有两个明显的反射波束, 偏转角分别为 30° 和 -32° , 与理论值吻合较好。

除了上述三个功能外, 通过调整编码序列还可以实现许多其他有趣功能, 如宽波束、高定向性波束、多波束、波束扫描等。一般来说, 不同功能的数量受到编码图案也

就是散射模式数量的限制。宽波束和多波束功能的数值验证详见附录 A 第 S2 小节。此外, 所提出的智能超表面还可以进一步扩展到其他频段。

4. 实验结果及讨论

加工制作的整个平台由声控模块、DAC 电路和尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的数字超表面组成。测试在微波暗室中进行, 实验设置如图 4 (a) 所示。机械转台上有一个长木板, 制作好的样品固定在木板的一端, 另一端放置标准喇叭天线作为发射天线。另一个标准喇叭天线作为接收

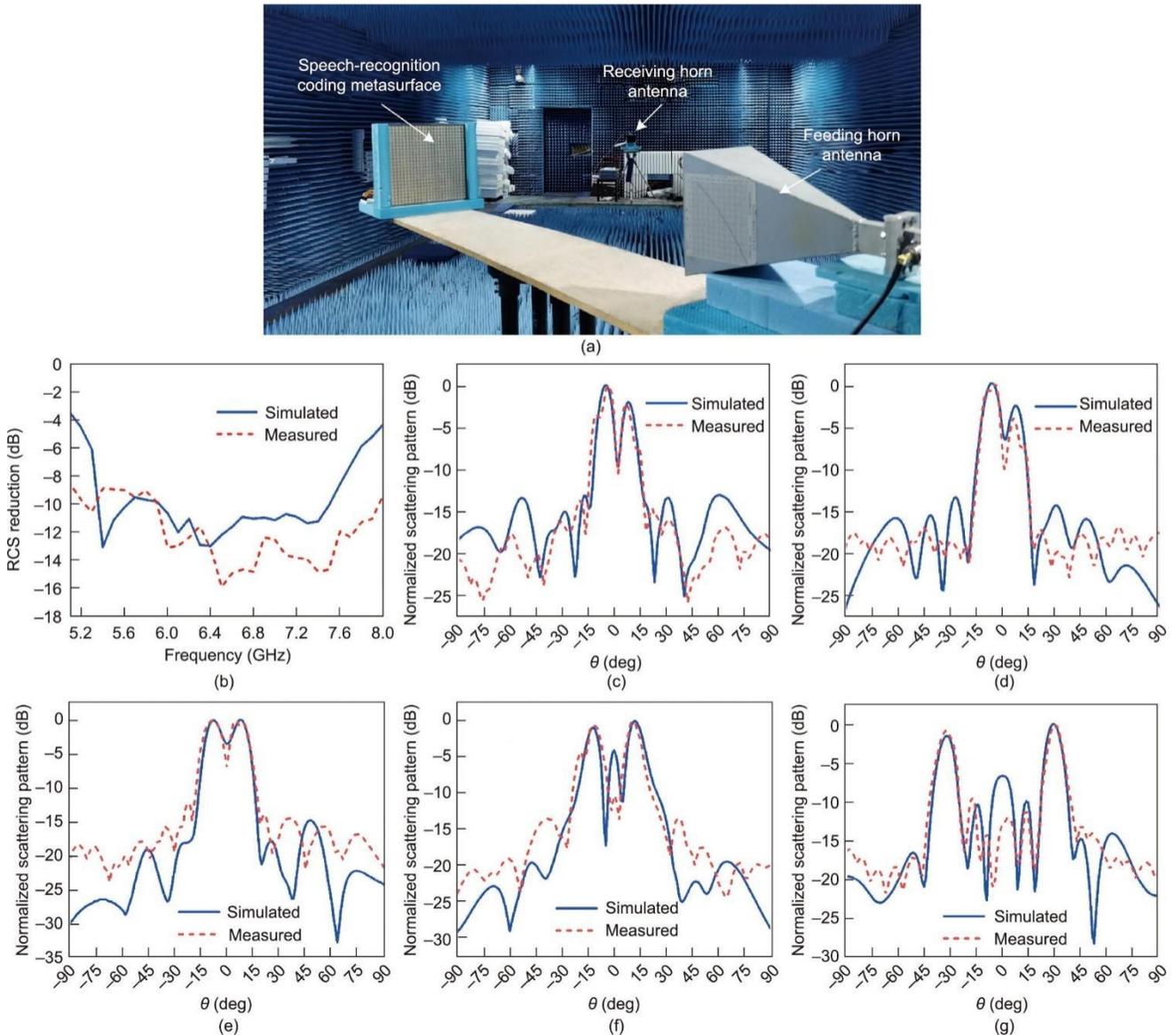


图 4. 基于语音识别的智能超表面仿真和测量结果。(a) 微波暗室实验装置; (b) RCS 缩减的仿真和测量结果; (c) 6 GHz 时, 正一阶涡旋波束的 E 面仿真和测试二维归一化散射方向图; (d) 6 GHz 时, 正一阶涡旋波束的 H 面仿真和测试二维归一化散射方向图; (e) 6 GHz 时, 正二阶涡旋波束的 E 面仿真和测试二维归一化散射方向图; (f) 6 GHz 时, 正二阶涡旋波束的 H 面仿真和测试二维归一化散射方向图; (g) 6 GHz 时, 波束分裂的仿真和测试二维归一化散射方向图。

天线放置在距离超表面和发射天线约 5 m 远的地方, 面向超表面, 三者摆放高度一致。当机械转台在水平面上旋转时, 喇叭天线发射的电磁波始终垂直入射到超表面, 接收天线能够接收到超表面反射到各个方向的电磁波。然后, 将接收到的数据发送到计算机进行后处理。

在实验过程中, 通过改变语音指令, 分别对 RCS 缩减, 正一阶、正二阶涡旋波和波束分裂这三种功能进行了测试。基于语音识别的智能超表面测量结果如图 4 所示。首先测试了 5~8 GHz 的单站 RCS 缩减。为了准确地测量出能量消散的数值, 测试了一块与超表面尺寸相同的金属板的辐射方向图。如图 4 (b) 所示, 从 5.1 GHz 到 8.0 GHz, RCS 缩减值可以达到 -7 dB, 在 6.5 GHz 时 RCS 最大缩减值可达 -15.88 dB。对于涡旋波, 图 4 (c) ~ (f) 给出 6 GHz 时正一阶和正二阶涡旋波的 E 面和 H 面测试结果。可以清楚地观察到方向图的中心有一个空心圆环, 中间镂空处的周围有两个波峰。正二阶涡旋波的发散角要略大于正一阶。测试的散射图与仿真的散射图吻合较好。在仿真和测试结果中, 涡旋波的能量非对称分布主要是由超级子单元的分辨率低和单元的幅度非均匀造成的。通过选择更高比特的编码单元或增加超级子单元数量, 可以提高智能超表面的性能。最后, 测试了 6 GHz 时波束分裂的二维远场方向图。从图 4 (g) 中可以看出, 两个反射波束分别指向 31° 和 -32°, 与仿真结果相对应。所设计的单元工作带宽较窄, 对于涡旋波, 该装置可以在 5.9~6.3 GHz 范围内工作良好; 对于波束分裂, 该装置在 5.8~6.4 GHz 范围内工作良好。

5. 结论

在本工作中, 提出、设计并验证了一种基于语音识别的智能超表面平台, 用于对电磁波束进行可编程调控。超表面的外部连接到语音控制系统, 其中语音识别模块识别语音指令, 单片机计算超表面所需的电压分布, DAC 生成相应的电压序列。通过改变语音指令, 可以以非接触的方式实现不同的功能。所提出的可编程超表面由 6×6 个超级子单元组成, 并且每个超级子单元中的所有 16 个单元被同时激励。通过控制加载在变容二极管上的偏置电压, 可以使超级子单元具有四种不同的反射状态。因此, 每个超级子单元可以独立控制。构建了一个 2 比特的智能超表面, 多种多样的散射模式可以通过设计不同的编码序列来重新配置。为了简化超表面设计, 采用了遗传算法对特定功能的相位分布进行优化。作为验证, 本研究演示了三种不同的功能: RCS 缩减、涡旋波束生成和波束分裂。

加工制作了一个样品来验证设计的多功能性。数值仿真和实验测试都验证了声控超表面平台的智能性。与以往研究工作相比, 本工作提供了一种以非接触式和实时的方式控制可编程超表面的新方法。这种智能超表面系统在未来的智能通信中具有潜在的应用前景。

致谢

本工作受到国家重点研发计划项目(2017YFA0700201、2017YFA0700203、2016YFC0800401)、国家自然科学基金(61890544)、中央高校基本科研业务费专项资金(2242021k30040)、111 项目(111-2-05)资助。

Compliance with ethics guidelines

Lin Bai, Yuan Ke Liu, Liang Xu, Zheng Zhang, Qiang Wang, Wei Xiang Jiang, Cheng-Wei Qiu, and Tie Jun Cui declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.026>.

References

- [1] Chen HT, Taylor AJ, Yu N. A review of metasurfaces: physics and applications. *Rep Prog Phys* 2016;79(7):076401.
- [2] Liu BH, Song CT. High gain transmitarray antenna based on ultra-thin metasurface. *Int J RF Microw Comput-Aided Eng* 2019;29(5):e21655.
- [3] Liu L, Zhang X, Kenney M, Su X, Xu N, Ouyang C, et al. Broadband metasurfaces with simultaneous control of phase and amplitude. *Adv Mater* 2014;26(29):5031-6.
- [4] Wong AMH, Eleftheriades GV. Perfect anomalous reflection with a bipartite Huygens' metasurface. *Phys Rev X* 2018;8(1):011036.
- [5] Sun SL, He Q, Hao JM, Xiao SY, Zhou L. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications. *Adv Opt Photonics* 2019;11(2):380-479.
- [6] Chen K, Feng Y, Cui L, Zhao J, Jiang T, Zhu B. Dynamic control of asymmetric electromagnetic wave transmission by active chiral metamaterial. *Sci Rep* 2017; 7(1):42802.
- [7] Bai L, Zhang XG, Wang Q, Huang CX, Jiang WX, Cui TJ. Dual-band reconfigurable metasurface-assisted Fabry-Pérot antenna with high-gain radiation and low scattering. *IET Microw Antennas Propag* 2020;14(15):1933-42.
- [8] Li WH, Qiu TS, Wang JF, Zheng L, Jing Y, Jia YX, et al. Programmable coding metasurface reflector for reconfigurable multibeam antenna application. *IEEE Trans Antenn Propag* 2021;69(1):296-301.
- [9] Gao X, Yang WL, Ma HF, Cheng Q, Yu XH, Cui TJ. A reconfigurable broadband polarization converter based on an active metasurface. *IEEE Trans Antenn Propag* 2018;66(11):6086-95.
- [10] Zhu H, Deng M, Chen S, Chen L. Graphene-based meta-coupler for direction-controllable emission of surface plasmons. *Opt Lett* 2019;44(13):3382-5.

- [11] Ju Z, Deng M, Wang J, Chen L. Reconfigurable multifrequency and wide-angle directional beaming of light from a subwavelength metal slit with graphene metasurfaces. *Opt Lett* 2020;45(10):2882–5.
- [12] Mou N, Liu X, Wei T, Dong H, He Q, Zhou L, et al. Large-scale, low-cost, broadband and tunable perfect optical absorber based on phase-change material. *Nanoscale* 2020;12(9):5374–9.
- [13] Huang YW, Lee HWH, Sokhoyan R, Pala RA, Thyagarajan K, Han S, et al. Gate-tunable conducting oxide metasurfaces. *Nano Lett* 2016;16(9):5319–25.
- [14] Cui TJ, Qi MQ, Wan X, Zhao J, Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light Sci Appl* 2014;3(10):e218.
- [15] Wan X, Xiao CK, Huang H, Xiao Q, Xu W, Wang JW, et al. User tracking and wireless digital transmission through a programmable metasurface. *Adv Mater Technol* 2021;6(7):2001254.
- [16] Bao L, Ma Q, Wu RY, Fu X, Wu J, Cui TJ. Programmable reflection-transmission shared-aperture metasurface for real-time control of electromagnetic waves in full space. *Adv Sci* 2021;8(15):2100149.
- [17] Zhang XG, Jiang WX, Jiang HL, Wang Q, Tian HW, Bai L, et al. An optically driven digital metasurface for programming electromagnetic functions. *Nat Electron* 2020;3(3):165–71.
- [18] Sun YL, Zhang XG, Yu Q, Jiang WX, Cui TJ. Infrared-controlled programmable metasurface. *Sci Bull* 2020;65(11):883–8.
- [19] Wu SR, Lai KL, Wang CM. Passive temperature control based on a phase change metasurface. *Sci Rep* 2018;8(1):7684.
- [20] Mao M, Liang Y, Liang R, Zhao L, Xu N, Guo J, et al. Dynamically temperature-voltage controlled multifunctional device based on VO₂ and graphene hybrid metamaterials: perfect absorber and highly efficient polarization converter. *Nanomaterials* 2019;9(8):1101.
- [21] Yu Q, Zheng YN, Gu Z, Liu J, Liang YC, Li LZ, et al. Self-adaptive metasurface platform based on computer vision. *Opt Lett* 2021;46(15):3520–3.
- [22] Ma Q, Bai GD, Jing HB, Yang C, Li L, Cui TJ. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions. *Light Sci Appl* 2019;8(1):98.
- [23] MA46H120 [Internet]. Lowell: MACOM; [cited 2020 Jun 21]. Available from: <https://www.macom.com/products/product-detail/MA46H120>.
- [24] Liu X, Gao J, Xu LM, Cao XY, Zhao Y, Li SJ. A coding diffuse metasurface for RCS reduction. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 2017;16:724–7.
- [25] Xu HX, Ma SJ, Ling XH, Zhang XK, Tang SW, Cai T, et al. Deterministic approach to achieve broadband polarization-independent diffusive scatterings based on metasurfaces. *ACS Photonics* 2018;5(5):1691–702.
- [26] Moccia M, Liu S, Wu RY, Castaldi G, Andreone A, Cui TJ, et al. Coding metasurfaces for diffuse scattering: scaling laws, bounds, and suboptimal design. *Adv Opt Mater* 2017;5(19):1700455.
- [27] Fu CF, Han LF, Liu C, Lu XL, Sun ZJ. Reflection-type 1-bit coding metasurface for radar cross section reduction combined diffusion and reflection. *J Phys D Appl Phys* 2020;53(44):445107.
- [28] Liu BY, Li SR, He YJ, Li Y, Wong SW. Generation of an orbital-angular-momentum-mode-reconfigurable beam by a broadband 1-bit electronically reconfigurable transmitarray. *Phys Rev Appl* 2021;15(4):044035.
- [29] Taher Al-Nuaimi MK, Hong W, Whittow WG. Nature-inspired orbital angular momentum beam generator using aperiodic metasurface. *J Phys D Appl Phys* 2021;54(27):275106.
- [30] Xiao Q, Ma Q, Yan T, Wu LW, Liu C, Wang ZX, et al. Orbital-angular-momentum-encrypted holography based on coding information metasurface. *Adv Opt Mater* 2021;9(11):2002155.
- [31] Shi H, Wang L, Peng G, Chen X, Li J, Zhu S, et al. Generation of multiple modes microwave vortex beams using active metasurface. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett* 2019;18(1):59–63.