利用时空编码超表面在电磁空间中实现可编程微积分运算

Hao Tian Shi[1,†], Lei Zhang[1,†,*], Rui Yuan Wu[2,*], Yi Ning Zheng[1], Xiao Qing Chen[1], Yuanzhe Li[1,3], Shi He[1], Jun Wei Wu[1], Qiang Cheng[1], 和 Tie Jun Cui[1,*]

[1] 毫米波国家重点实验室，东南大学，中国南京 *210096*[2] 信息科学与工程学院，河海大学，中国南京 *211100*[3] 自动目标识别国家重点实验室，电子科学与技术学院，国防科技大学，中国长沙 *410073*

† 这些作者对本研究的贡献相同。

* 通讯作者：电子邮箱：lzseu@seu.edu.cn；ruiyuanwu@126.com；tjcui@seu.edu.cn .

摘要

随着超表面的快速发展，以及简化信息系统对可编程超表面日益增长的需求，利用超表面进行基于波的计算已成为一个颇具吸引力的研究课题。为实现电磁（EM）空间中的数学运算，我们在此提出一种时空编码超表面（STCM）系统，可直接对电磁波的空间能量分布执行微积分运算。通过利用时变编码诱导的谐波特性，可以灵活控制超构原子在特定谐波处的响应，从而使超表面系统能够处理更复杂的任务。得益于其可编程性，STCM 可实时动态切换功能，以适应不同的微积分任务。为充分发挥 STCM 的能力，我们不仅提出了用于电磁波微分和积分的时空编码序列，还设计并通过数值仿真验证了可在同一入射电磁波上独立且同时实现不同微积分运算的时空编码序列。为通过实验验证电磁微积分运算的可行性，我们使用可编程的 2位时空编码超表面开展了概念验证实验。理论、数值仿真与实验结果高度吻合，证实了在电磁空间中执行微积分运算的可行性，并展现了 STCM 在电磁波调控、无线通信和信号处理中的广阔应用前景。

引言

可编程电磁（EM）超表面的提出 [1] 为电磁波调控提供了一种灵活且强大的方法，可广泛应用于复杂的电磁调控 [2-4], 无线通信 [5-8], 和传感 [9-11]。随着电磁信息论的发展, [12,13], 利用超表面直接表征和处理信息已成为一个引人关注的研究课题，而其中一项关键挑战是利用可编程超表面直接对空间电磁波执行数学运算。与依赖复杂计算硬件和大量存储资源的数字计算相比，直接对空间电磁波执行数学运算是一种模拟计算范式, 具有近光速处理能力 [14-16], ，可直接在物理空间中处理电磁信号，并降低数字硬件中的信号处理复杂度。

编码超表面上的卷积 [17] 和加法 [18] 运算为直接利用电磁波进行计算提供了理论基础和可行方案。尽管卷积和加法运算广泛适用于波束成形和波束扫描等功能，但传统可编程超表面受限于编码状态数量有限，难以执行更复杂的数学运算。克服这一限制的一种可能方案是使用堆叠式可编程超表面。通过精心设计结构和编码图案，堆叠式超表面能够通过衍射 [19], 实现完全基于电磁波的人工神经网络，从而近似实现各种数学运算。迄今为止，堆叠式超表面已在多种应用中得到探索，包括到达方向（DOA）估计 [20], 计算成像重建 [21], 和智能感知[22]。然而，可编程堆叠式超表面存在固有缺点，例如系统剖面增大、控制架构复杂。解决编码状态有限问题的另一种可能方案是采用具有固定物理构型的无源超表面。通过设计超构原子的几何结构，可以灵活调控无源超表面的相位和振幅响应；近期研究已通过实验展示了其复杂功能，例如求解线性方程 [23] 以及对空间电磁波执行微积分运算 [24-25] 。然而，无源超表面一经制造，其功能便

固定不变，因此只能用于有限类别的问题，限制了其执行多功能和自适应运算的能力。

解决上述局限性的一种有前景的方法，是采用时空编码超表面（STCMs）[26] 进行电磁数学运算。通过将时间调制引入编码方案，时空编码超表面能够借助更高的时间复杂度，实现对电磁波的精确控制。通过精心设计的周期编码序列，可以对特定谐波频率下的振幅和相位响应进行近乎连续的调谐。得益于时空编码策略和谐波调制特性，时空编码超表面非常适合实现各种复杂功能。围绕时空编码超表面已经开展了大量研究，例如编码优化[27,28], 电磁操控[29-34], 信号处理[33-37], 和无线通信[38-43], ，展现了其在射频技术中的散射与辐射操控[44-49], 、硬件诊断[50,51], 和成像[52,53] 等方面的广阔应用潜力。因此，采用时空编码超表面为实现复杂数学运算和获得可编程功能特性提供了一种有效且灵活的方法。

为验证STCM在可编程电磁数学运算中的有效性，我们设计了一种基于可编程2位STCM的波动式可编程微积分运算平台，并采用了专门设计的时空编码策略。2位编码特性为调控谐波响应提供了足够的自由度，而可编程性则赋予平台实现复杂函数的多功能能力。对于所提出的STCM，我们针对不同函数（包括微分运算和积分运算）优化相应的编码序列，并预先加载至FPGA模块，使STCM能够根据不同的控制指令执行各种函数。受超表面卷积理论以及近场与远场电磁波分布之间傅里叶关系的启发，我们精心优化了多组时空编码序列，从而能够在电磁空间中实现微分运算和积分运算。此外，通过利用谐波资源，我们设计了一种时空编码序列，可针对同一入射波同时在基波处执行微分运算、在二次谐波处执行积分运算。设计目标与

测量结果高度一致，表明STCM平台在实现电磁数学运算方面性能良好，凸显了其在电磁操控、信号处理和成像领域的广泛应用潜力。与以往仅依赖单一谐波频率[54]、且仅聚焦于理论分析和数值仿真的基于超表面的数学运算研究相比，本工作不仅实现了用于可编程电磁微积分运算的实际STCM原型，还充分利用了多谐波资源以增强功能。

基于超表面的微积分平台框架

图 1 展示了所提出的基于STCM的微积分平台的结构设计，以及微分算子实现方式的示意图。STCM微积分平台通过利用两种傅里叶变换关系来运行，即时间编码序列与频域谐波之间的傅里叶关系，以及近场响应与远场散射图样之间的傅里叶关系。借助这两种傅里叶变换机制，可以有效实现对入射电磁波的微积分运算。

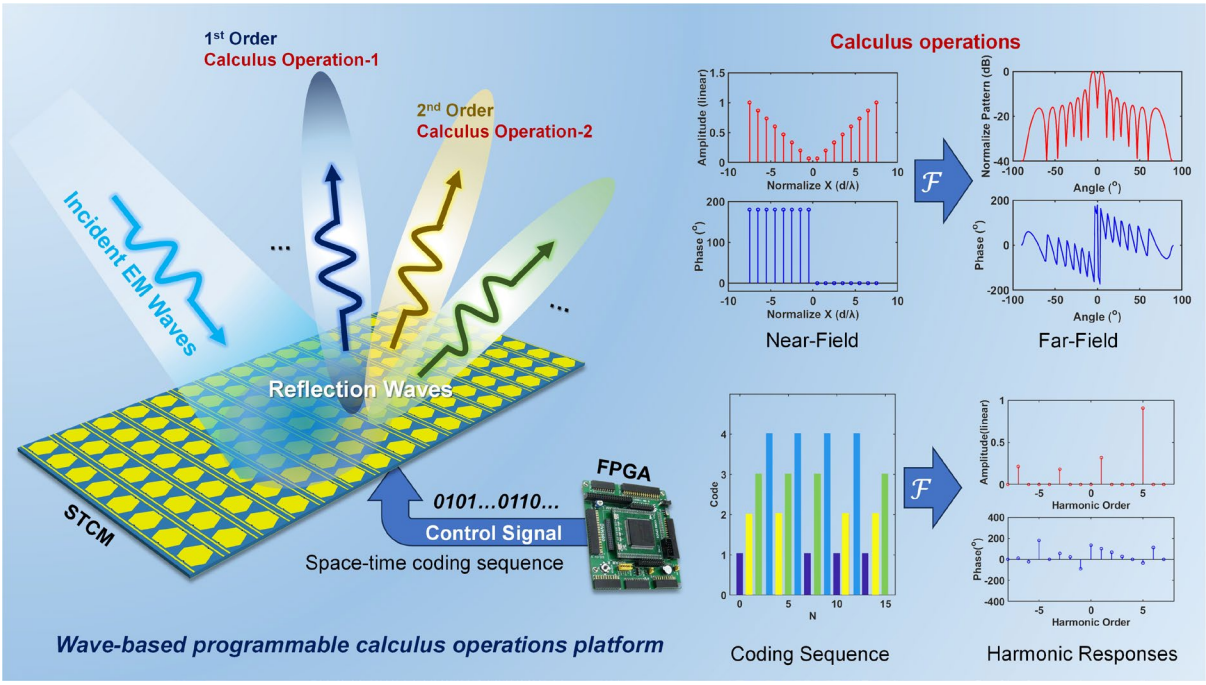

图 1. 基于波的可编程微积分运算平台示意图，该平台可在+1st 和+2nd 谐波中使用 STCM 执行不同的微积分运算。STCM 由现场可编程门阵列控制，可通过不同的时空编码序列表征微积分算子，并对入射电磁波直接执行微积分运算。

时间编码序列与谐波响应之间的傅里叶变换关系，为任意操控特定谐波频率下的振幅和相位响应提供了一种有前景的解决方案，从而能够在超表面上表征微积分算子。对于长度为L的给定时间编码序列，编码序列c_n与谐波响应Γ_k之间的关系可表示为[26]:

$$\Gamma_k = \sum_{n=1}^{L} c_n e^{-j\frac{k2\pi n}{L}} \tag{1}$$

近场电磁响应与远场图样之间的傅里叶变换关系，使得能够表示由所提出的超表面实现的不同数学算子，从而在远场散射图样中执行微积分运算。对于具有连续电磁响应的超表面，近场响应$r(x)$及其对应的一维远场散射图样$R(\theta)$可表示为:

$$R(\theta) = \int_{x_{min}}^{x_{max}} r(x) e^{-j\frac{2\pi x \sin\theta}{\lambda}} dx \tag{2}$$

其中，λ为入射电磁波的波长。对于本研究采用的所提出超表面，其电磁响应在空间上是离散的。因此，离散近场响应$r(x_i)$和散射方向图$R(\theta)$可进一步表示为:

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^{N} r(x_i) e^{-j\frac{2\pi x_i \sin\theta}{\lambda}} \tag{3}$$

其中，x_i为超构原子的中心，N为超构原子的数量。

进行数学计算时，所提出的STCM由单色电磁波照射，并根据远场分布$F(\theta)$生成近场分布$f(x)$。超表面在特定谐波处产生相位和幅度分布$r(x_i)$，以表示数学算子。通过测量所产生的远场图样，可获得数学计算的输出$F_1(\theta)$，其中$F_1(\theta)$可表示为:

$$F_1(\theta) = \sum_{i=1}^{N} f(x_i) r(x_i) e^{-j\frac{2\pi x_i \sin\theta}{\lambda}} \tag{4}$$

根据傅里叶变换关系，近场中$f(x)$与$r(x_i)$的乘积对应于远场中$F(\theta)$与$R(\theta)$的卷积。因此，若通过微积分算子对相位和幅度分布$r(x_i)$进行优化，超表面便可在远场散射方向图中对入射电磁波执行微积分运算。

理论结果与数值仿真

为实现实际的基于STCM的微积分运算，我们采用2比特可编程超表面作为硬件平台。所用超表面的配置及其电磁反射响应如**图2**所示，超构原子的详细结构可见我们此前的工作[39]。超构原子的反射响应由嵌入其中的两个PIN二极管控制。为方便起见，将PIN二极管状态的四种不同组合定义为从00到11的四种不同二进制编码状态。表1总结了编码状态以及超构原子在10.3 GHz下测得的反射响应。

表1. 超构原子的编码状态及反射响应

编码状态	PIN 二极管-1	PIN 二极管-2	振幅（dB）	相位（°）
00	OFF	OFF	-0.06	12°
01	ON	OFF	-2.86	102°
10	OFF	ON	-3.25	186°
11	ON	ON	-0.98	289°

*反射响应在 10.3 GHz 下测量

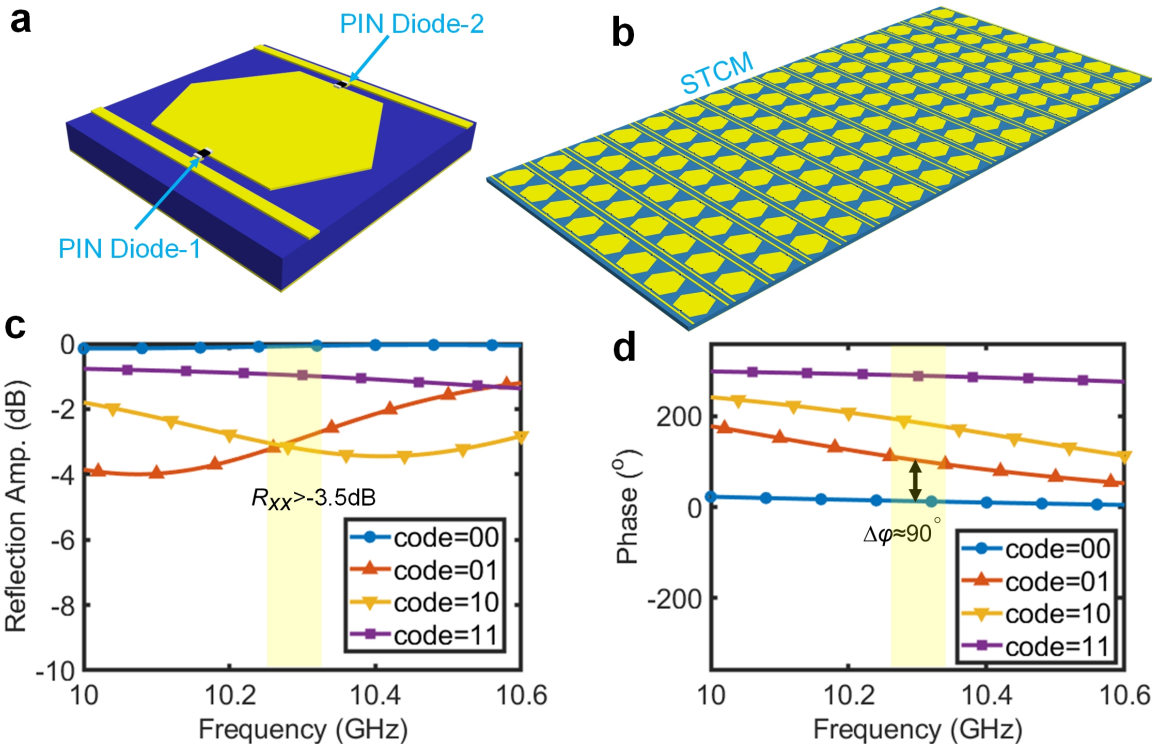

图2. STCM 超构原子的结构和反射响应。 a) 超构原子的结构。b) 具有16列的2位STCM原型实物示意图。c) 超构原子在不同编码状态下的反射幅度。d) 超构原子在不同编码状态下的反射相位。

为进一步评估超构原子的性能，图2c和图2d展示了所采用超构原子在频带 10~10.6 GHz 内的测量结果。这些结果表明，所提出的超构原子具有四种不同的相位响应，相位增量约为 90°；在 10~10.6 GHz 频段内的四种不同编码状态下，其反射振幅均稳定高于 -3.5 dB。2位编码性能证实，所提出的超表面可作为实现微积分运算的理想硬件平台。

为验证基于STCM的微积分平台的概念，我们对一个由16列组成、各列可独立控制的原型进行了仿真，如图2b所示。根据时间编码序列与谐波响应之间的傅里叶变换关系，如果能够任意调控超构原子的振幅和相位响应，则可对给定的谐波响应序列进行傅里叶逆变换，得到时间编码序列。然而，对于给定的2比特可编程超表面，超构原子仅具有四种有限的反射响应。因此，对于长度为L的给定周期性时域编码序列，时间编码序列的优化可视为有限状态空间中的搜索问题。为加快最优时间编码序列的求解过程，优化中采用遗传算法（GA）。

为展示遗传算法在优化编码序列方面的有效性，我们分别在一阶谐波处进行微分运算和积分运算。在一阶谐波处进行微分运算时，具有err_k L个相互独立且可控编码单元的 STCM 中，不同编码单元的时空编码序列所需满足的约束条件表示为

$$err_k = \left|\left(k - \frac{N+1}{2}\right) jA - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}}\right| \tag{5}$$

其中，k为编码单元的编号，A为用于控制谐波振幅的常数。当A设为0.0875且err_k 最小时，图3a展示了具有16列编码单元的STCM优化结果，图3c和图3d给出了各超构原子的近场谐波响应。为说明微分运算的性能，我们仿真了法向入射电磁波照射所提出超表面时的散射方向图。图3d展示了与STCM微积分平台面积相同的金属板的散射方向图，而图3e

展示了STCM微积分平台执行微分运算的仿真结果，以及从尺寸相同的金属板反射的入射波所对应的理论微分结果。

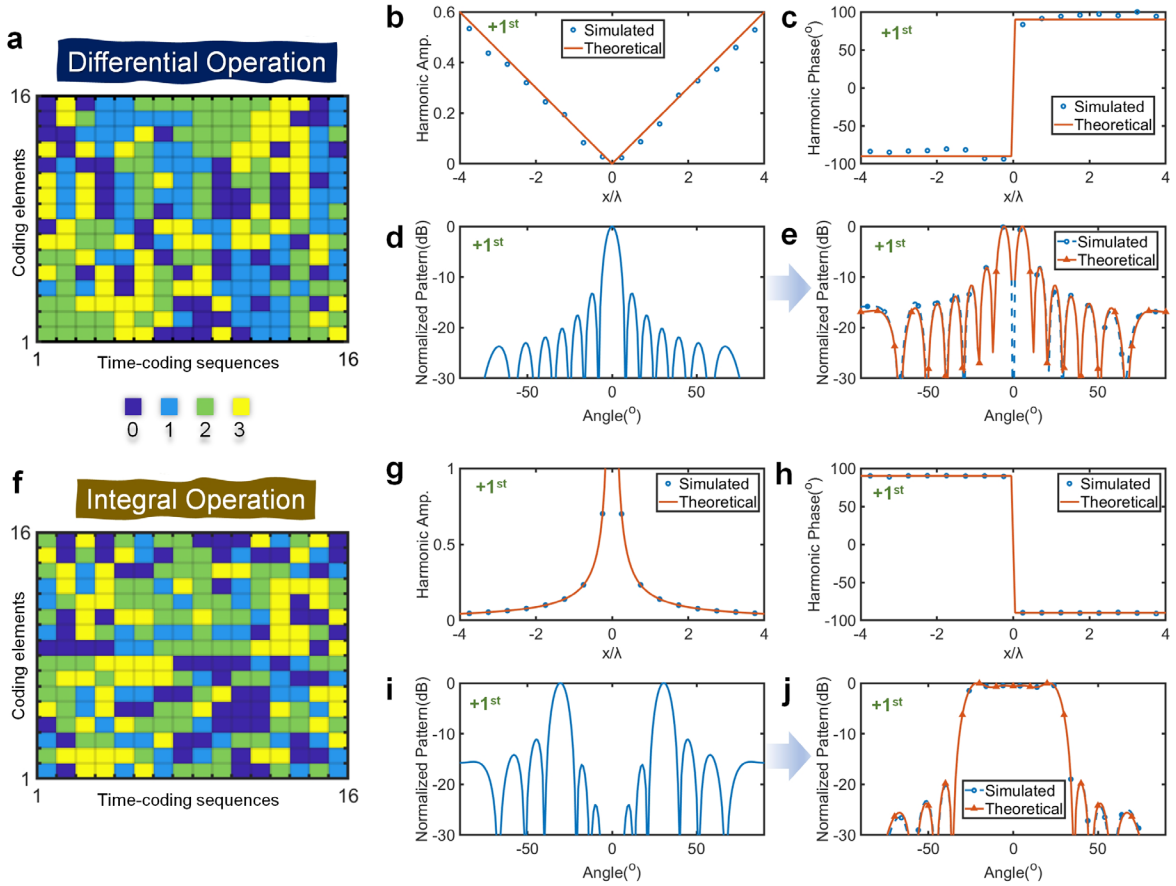

图3。 在+1st 谐波处执行微分或积分运算的仿真结果。 a) STCM在+1st 谐波处执行微分运算的时空编码序列。b) 微分运算中不同编码单元的幅度响应。c) 微分运算中不同编码单元的相位响应。d) 具有相同面积的金属板被正入射平面波照射时的归一化散射方向图。e) 超表面执行微分运算时被正入射平面波照射的归一化散射方向图。f) STCM执行积分运算的时空编码序列。g) 积分运算中不同编码单元的幅度响应。h) 积分运算中不同编码单元的相位响应。i) 具有相同面积的金属板被±30°的微分入射波照射时的归一化散射方向图。j) 超表面执行积分运算时被±30°的微分入射波照射的归一化散射方向图。

对于积分运算，时空编码序列的约束条件定义为误差$_k$

$$err_k = \left| \frac{jA}{k-\frac{N+1}{2}} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{6}$$

当将A设为0.35并最小化err_k时，超表面的优化结果

采用16列编码的结果如图3f所示，meta-atom的近场谐波响应如图3g和图3h所示。为展示积分运算的性能，我们模拟了所提出的超表面在±30°角度下受到微分入射波照射时的散射方向图，其中来自30°和-30°方向的入射波相位差为180°。图3i展示了与超表面面积相同的金属板的散射方向图，图3j展示了STCM微积分平台执行积分运算的仿真结果，以及相同尺寸金属板反射的入射波的理论积分结果。

在谐波响应中，仿真结果与理论值吻合良好，这证明了遗传算法在优化时空编码序列方面的有效性，也体现了 STCM 在谐波操控方面无与伦比的自由度。在远场散射图样中，STCM微积分平台能够通过微分运算成功地将单波束分裂，并通过积分运算将微分入射波转换为扇形波束。理论微分波束和积分波束与 STCM 的远场散射图样具有良好的一致性，这证明了利用超表面对空间电磁波直接进行微积分运算的可行性。这些结果凸显了超表面在电磁操控和信号处理领域的广阔应用前景。

为充分发挥 STCM 的电磁操控能力并拓展其在电磁微积分运算方面的潜力，我们对时空编码序列进行优化，使其能够在基波同时执行微分运算，并在二次谐波执行积分运算。该时空编码序列对应的约束条件err_k 定义如下

$$err_k = \sqrt{\left|\left(k-\frac{N+1}{2}\right)jA_1 - \sum_{n=1}^{L} c_{kn}e^{-j\frac{2n\pi}{L}}\right|^2 + \left|\frac{jA_2}{k-\frac{N+1}{2}} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn}e^{-j\frac{4n\pi}{L}}\right|^2} \tag{7}$$

为确保编码优化的可行性，对A_1 和A_2施加以下约束：

$$\sqrt{\left[\left(k-\frac{N+1}{2}\right)A_1\right]^2 + \left(\frac{jA_2}{k-\frac{N+1}{2}}\right)^2} < 1 \tag{8}$$

当 A_1=0.075 且 A_2=0.35 时，图示为 STCM 同时在基波和二次谐波中执行微分运算与积分运算的仿真结果，见 **图4**。与分别在基波中执行微分运算和积分运算的结果（见图3）相比，

图4c–4f 中同时执行微分运算与积分运算时，基波和二次谐波的振幅与相位响应偏离理论值更多。不过，仿真结果仍验证了在不增加编码长度的情况下，可在不同谐波中执行不同微积分运算的可行性。此外，误差较大的仿真点通常对应较小的振幅，因此对微积分运算的影响较小。

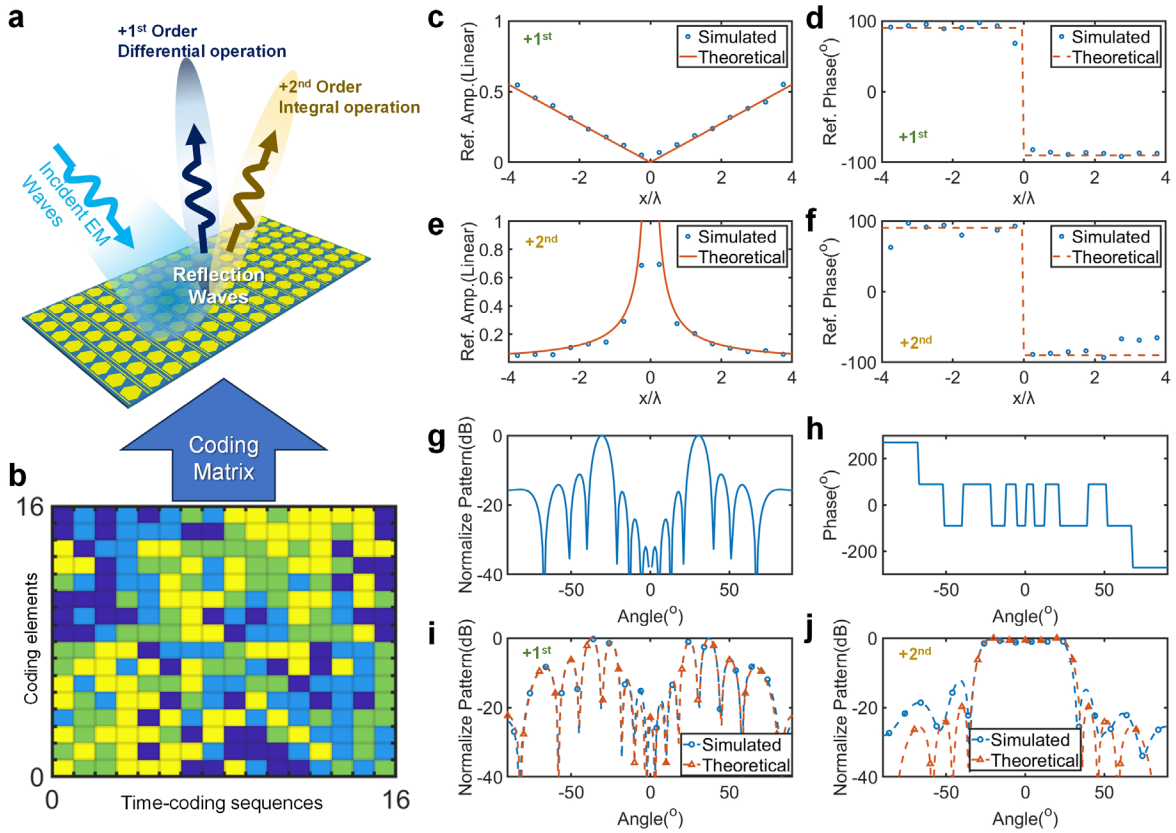

图4。 分别在+1st 和+2nd 谐波上同时执行微分运算和积分运算的仿真结果。 a) 同时执行微分运算和积分运算的 STCM 示意图。b) 在两个谐波上执行微积分运算的时空编码序列。c) +1st 谐波下不同编码单元的幅度响应。d) +1st 谐波下不同编码单元的相位响应。e) +2nd 谐波下不同编码单元的幅度响应。f) +2nd 谐波下不同编码单元的相位响应。g) 相同面积金属板在±30°处受到微分入射波照明时的归一化散射方向图。h) 金属板在相同照明下的相位分布。i) 执行微分运算时，相同照明下 STCM 在+1st 谐波处的归一化散射方向图。j) 执行积分运算时，相同照明下 STCM 在+2nd 谐波处的归一化散射方向图。

为进一步评估 STCM微积分平台的性能，我们对具有预设计时空编码序列的超表面在微分入射

波以 ±30°照明时的第一和第二谐波散射图样进行了数值仿真。作为对比，图 4g 和图 4h 展示了相同照明条件下与超表面面积相同的金属板的反射振幅和相位，而图 4i 和图 4j 则展示了第一和第二谐波的远场散射图样。仿真结果与理论值高度一致，有力地支持了 STCM 在多功能微积分运算方面的应用前景。

为进一步验证 STCM 直接对电磁波执行微积分运算的可行性，我们考虑一种图像处理的实际应用：对图像进行微分可以增强其边缘，从而便于边缘检测。为展示 STCM 微积分平台的边缘增强效果，我们对由 16×16 个可独立控制的超构原子组成的 STCM 进行了数值仿真，并采用周期为 16 个时隙的时空编码序列。在编码优化过程中，时空编码序列的约束条件定义为 err_{kl}

$$err_{kl} = \left| \left(\sqrt{k^2 + l^2} - \frac{N+1}{2} \right) e^{-j \tan^{-1}\left(\frac{k-\frac{N+1}{2}}{l-\frac{N+1}{2}} \right)} A - \sum_{n=1}^{L} c_{kln} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{9}$$

其中，k 和 l 分别表示超构原子对应的行号和列号。

优化后的时空编码序列在基波处的振幅和相位响应仿真结果如$A_{\max}$=0.052、**图5a**和**5b**所示。结果表明，反射振幅呈圆锥分布，相位呈涡旋分布，这对应于二维（2D）一阶微分算子的傅里叶变换。为验证基于STCM的微积分平台的边缘增强效果，我们针对三种不同的结构化电磁波进行了仿真。这些电磁波在与超表面面积相同的PEC板的远场散射图样中形成了“S”“E”和“U”三个不同的图像，如图5c、5e和5g所示。STCM执行二维微分运算后，反射结构化电磁入射波所得到的相应仿真结果如图5d、5f和5h所示。仿真中，利用正弦函数将俯仰角和方位角归一化至-1至1的范围。结果表明，含有16×16 个超构原子的超表面能够成功对入射波执行二维微分运算并实现边缘增强，说明基于STCM的微积分平台在图像处理方面具有巨大潜力

应用。

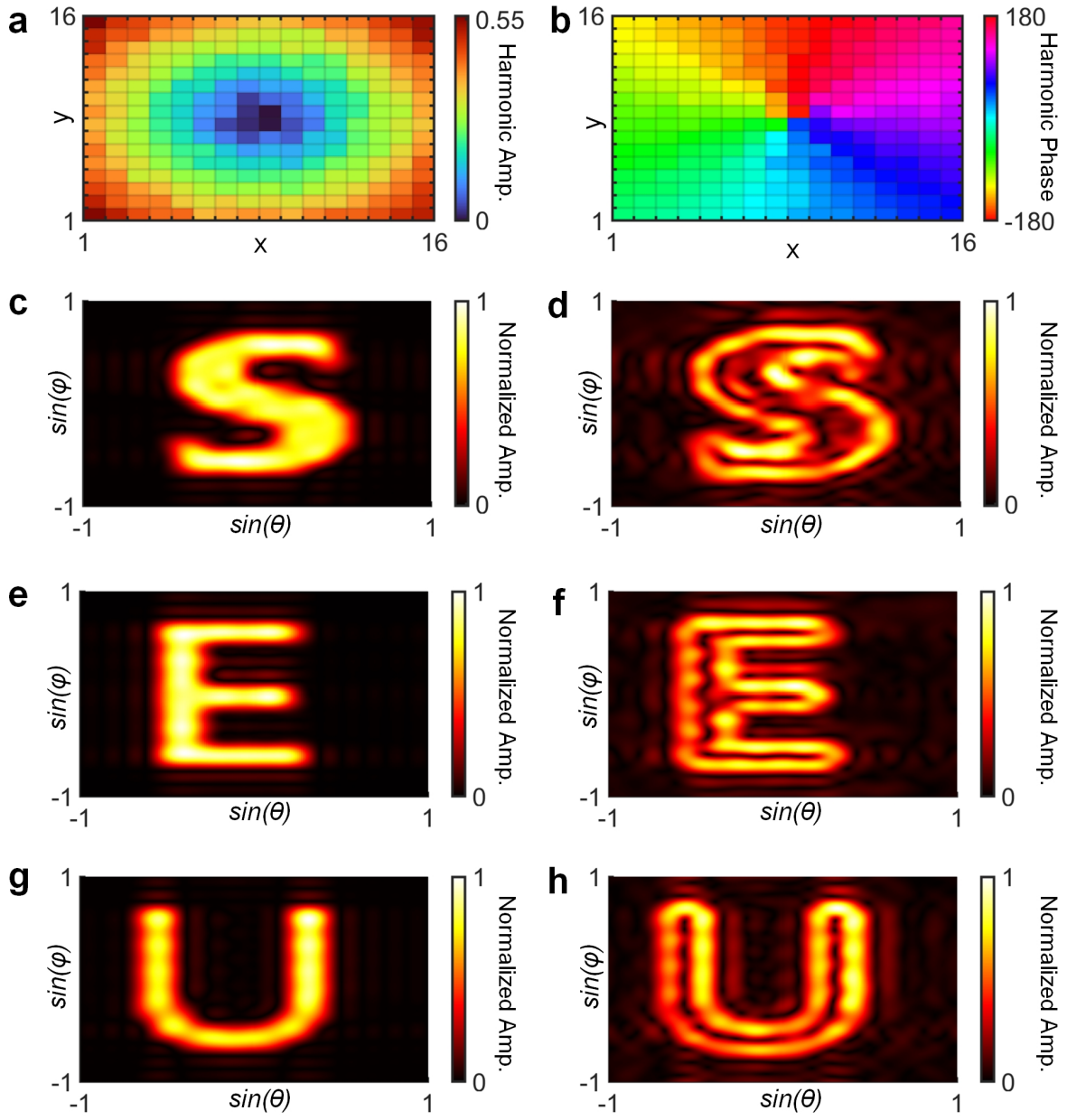

图5。 在+1st 谐波下进行边缘增强的二维微分运算仿真结果。a) 含有16×16 个超构原子的STCM振幅分布。b) 含有16×16 个超构原子的STCM相位分布。c-h) 金属板（c、e、g）和STCM微积分平台（d、f、h）分别对字母“S”、“E”和“U”进行边缘增强时的散射图样。

实验验证

仿真结果验证了利用STCM执行微积分运算的可行性。为构建微积分平台并评估其性能，我们制作了一个由印刷电路板（PCB）制成的16×8 反射式可编程超表面，以实现实用的STCM原型。该原型在微波远场暗室中进行了测量

为验证其功能和性能，测量设置如**图6a**所示。为实现谐波操控，我们通过FPGA控制模块以1 MHz的调制频率动态地向超表面施加控制信号。连接至发射天线的信号发生器用于生成频率为10.3 GHz的单色入射电磁波。旋转平台从-90°旋转至90°的过程中，由接收天线接收远场散射图样。

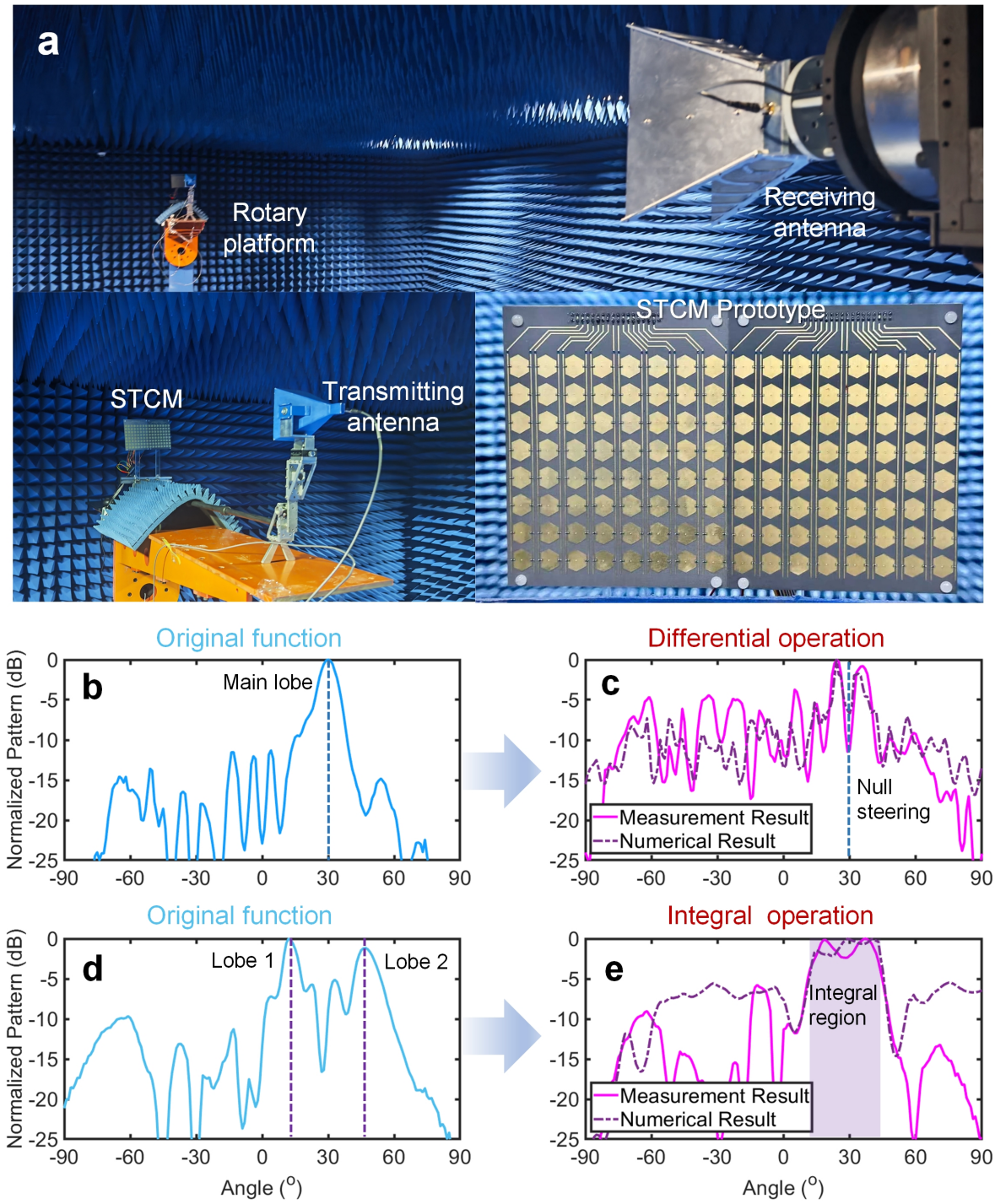

图6. 基于STCM的微积分运算的实验装置与测量结果。 a) 基于STCM的微积分平台的实验装置与测量环境。b) 散射

微分运算中原函数的散射方向图。c）原函数1的微分运算的测量结果和数值计算结果。d）积分运算中原函数的散射方向图。e）原函数2的积分运算的测量结果和数值计算结果。

为避免发射天线受到遮挡，在时空编码序列的优化中引入相位梯度，使反射波束偏转30°。为验证微分运算，原函数中第k列时空编码序列的约束条件err_{k0}定义为

$$err_k = \left| e^{-j2\pi\frac{kd}{\lambda}\sin\frac{\pi}{6}} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{10}$$

其中，d为每列的宽度，λ为运算波长。对于微分运算，第k列时空编码序列的约束条件err'_{k1}定义为

$$err'_k = \left| \left(k - \frac{N+1}{2}\right) jA_{max} e^{-j2\pi\frac{kd}{\lambda}\sin\frac{\pi}{6}} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{11}$$

理论上，原函数在基波处的远场散射图样形成一个指向30°的单波束，而执行微分运算的STCM的散射方向图则呈现分裂波束，在30°处出现零点，并在原函数的上升沿和下降沿各形成一个峰值。为评估微分运算的性能，图6c展示了原函数1的数值微分结果，以及实现微分运算的STCM散射方向图的实测结果。尽管旁瓣区域存在差异，但数值结果和实测结果均在主瓣区域表现出优异的微分性能，与理论预测相当吻合。

对于积分运算，由于难以产生微分入射波，因此通过调整时空编码序列的谐波响应来实现原函数。为了形成一对相位差为 180° 的波束，采用 1比特相位编码序列 C_0 来约束超表面单元的谐波响应，其中 C_0 = 0000111100001111。类似地，为避免发射天线造成遮挡，在原函数和积分运算中优化时空编码序列时，加入了能够使反射波束偏转 30° 的相位梯度。优化原函数的约束条件 err_k 定义为

$$err_k = \left| e^{-j(2\pi\frac{kd}{\lambda}\sin\frac{\pi}{6}-C_0(k)\pi)} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{12}$$

而优化积分运算的约束条件 err'_{kl} 定义为

$$err'_k = \left| \frac{jA_{max}}{k-\frac{N+1}{2}} e^{-j(2\pi\frac{kd}{\lambda}\sin\frac{\pi}{6}-C_0(k)\pi)} - \sum_{n=1}^{L} c_{kn} e^{-j\frac{2n\pi}{L}} \right| \tag{13}$$

理论上，原函数在基波处的散射方向图在30°附近形成两个对称波束，而执行积分运算的超表面的散射方向图则在30°附近产生一个振幅稳定的波束。测量结果如图6d和图6e所示。具体而言，在积分函数情况下，原函数的实测散射方向图在13°和47°处呈现两个相位差为180°的波瓣。相比之下，积分运算产生的散射方向图保持稳定，在13°至43°的角度范围内，归一化振幅高于−3 dB。原函数的数值积分结果也呈现在图6e中。尽管在旁瓣区域观察到测量结果与数值结果之间存在差异，但在积分区域内，数值积分与测量结果表现出令人满意的一致性，同时旁瓣中的功率电平远低于积分区域内的功率电平。总体而言，30°附近的测量结果与理论分析具有良好的一致性，证实了使用STCM实现积分运算的可行性。

总而言之，尽管 PIN二极管的非理想导通率导致了测量误差差异，且超表面的仿真性能与实测性能之间不可避免地存在差异，但基于 STCM 的微积分平台所获得的实验结果表明，该平台具有在电磁空间中执行微积分运算的强大能力。

结论

我们提出了一种基于可编程 STCM 的微积分运算平台。精心设计的反射型超表面具有2比特相位响应和稳定的反射振幅，为基于电磁波的微积分平台提供了可靠的硬件基础。通过采用不同的时间编码序列，可以灵活而精确地控制特定谐波处的反射相位和振幅，使 STCM 能够在傅里叶变换域中模拟微分和积分

算子。利用近场响应与远场散射图样之间的傅里叶变换关系，所提出的 STCM 可在电磁空间中直接实现微积分运算。与以往方法相比，STCM 微积分平台具有多样化、可重新编程且多功能的运算能力，同时外形低矮。此外，STCM 的可编程特性为提升性能和扩展功能提供了巨大潜力。理论分析、数值仿真和实验测量结果高度吻合，证实了 STCM 在电磁空间中执行微积分运算的可行性，并凸显了 STCM 在无线通信、遥感和信号处理领域的广阔应用前景。

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会（62288101、62101123、U22A2001 和 62201136）、国家重点研发计划（2023YFB3811504）、江苏省前沿引领技术基础研究项目（BK20210210、BK20212002）、小米基金会，111计划（111- 2-05）、东南大学博士生创新能力提升计划（CXJH_SEU 26088）以及中央高校基本科研业务费（2242023K5002）的资助。

参考文献

[1] Cui, T.J., Qi, M.Q., Wan, X., Zhao, J., and Cheng, Q.: '编码超材料、数字超材料与可编程超材料', Light-Sci Appl, 2014, 3[2] Bai, X.D., Kong, F.W., Sun, Y.T., Wang, G.F., Qian, J.Y., Li, X.B., Cao, A.J., He, C., Liang, X.L., Jin, R.H., and Zhu, W.R.: '用于多模轨道角动量生成的高效率透射式可编程超表面', Adv Opt Mater, 2020, 8, (17)[3] Hu, X.J., Peng, L., Zhuo, R.F., Zhang, S., and Ye, D.X.: '用于微波频段面内电磁波调控的可编程超材料', Laser Photonics Rev, 2025, 19, (6)[4] Chen, B.W., Wu, J.B., Li, W.L., Zhang, C.H., Fan, K.B., Xue, Q., Chi, Y.J., Wen, Q.Y., Jin, B.A.B., Chen, J., and Wu, P.H.: '具有非易失性存储器的可编程太赫兹超材料', Laser Photonics Rev, 2022, 16, (4)[5] Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M.S., Yuen, C., de Rosny, J., and Tretyakov, S.: '可重构智能表面赋能的智能无线电环境：工作原理、研究现状与未来发展方向', Ieee J Sel Area Comm, 2020, 38, (11), pp. 2450–2525[6] Liang, J.C., Zhang, L., Luo, Z.J., Jiang, R.Z., Cheng, Z.W., Wang, S.R., Sun, M.K., Jin, S., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '用于无干扰无线通信的滤波可重构智能表面', Nat Commun, 2024, 15, (1)[7] Wang, Z.X., Wu, J.W., Xu, H., Dai, J.Y., Liu, S., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '一种双极化

用于绿色安全无线通信的可编程超表面', Adv Sci, 2024, 11, (32)[8] Xiong, Q., Zhang, Z.J., Ma, X.L., Huang, C., Pu, M.B., Luo, J., Guo, Y.H., Wang, Y.X., Bai, W.L., Ye, J., Yan, L.S., and Luo, X.A.: '基于幅相可重构空间编码波束成形超表面的多信道无线通信', Adv Electron Mater, 2024, 10, (8)[9] Jiang, R.Z., Ma, Q., Gu, Z., Liang, J.C., Xiao, Q., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '基于自适应信息超表面的智能感知与波束成形同步实现', Adv Sci, 2024, 11, (7)[10] Liu, Y.H., Li, X.H., Zhang, Z.T., Qi, K.N., Lu, L., Wang, S.Y., and Li, Y.B.: '智能超表面的入射角感知与散射自适应控制', Adv Sci, 2024, 11, (40)[11] Li, L.L., Ruan, H.X., Liu, C., Li, Y., Shuang, Y., Alù, A., Qiu, C.W., and Cui, T.J.: '机器学习可重编程超表面成像仪', Nat Commun, 2019, 10[12] Wu, H.T., Bai, G.D., Liu, S., Li, L.L., Wan, X., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '超表面信息论', Natl Sci Rev, 2020, 7, (3), pp. 561–571[13] Bai, X.Y., Tan, S.R., Mikki, S., Li, E.R., and Cui, T.J.: '可重构超表面赋能的直接数字调制系统的信息论度量：电磁学视角', Prog Electromagn Res, 2024, 179, pp. 1–18[14] Silva, A., Monticone, F., Castaldi, G., Galdi, V., Alù, A., and Engheta, N.: '利用超材料执行数学运算', Science, 2014, 343, (6167), pp. 160–163[15] Estakhri, N.M., Edwards, B., and Engheta, N.: '能够求解方程的逆向设计超结构', Science, 2019, 363, (6433), pp. 1333–1[16] Zangeneh-Nejad, F., Sounas, D.L., Alu, A., and Fleury, R.: '利用超材料进行模拟计算', Nat Rev Mater, 2021, 6, (3), pp. 207–225[17] Liu, S., Cui, T.J., Zhang, L., Xu, Q., Wang, Q., Wan, X., Gu, J.Q., Tang, W.X., Qi, M.Q., Han, J.G., Zhang, W.L., Zhou, X.Y., and Cheng, Q.: '编码超表面上的卷积运算，实现太赫兹波的灵活连续调控', Adv Sci, 2016, 3, (10)[18] Wu, R.Y., Shi, C.B., Liu, S., Wu, W., and Cui, T.J.: '数字编码超材料的加法定理', Adv Opt Mater, 2018, 6, (5)[19] Liu, C., Ma, Q., Luo, Z.J., Hong, Q.R., Xiao, Q., Zhang, H.C., Miao, L., Yu, W.M., Cheng, Q., Li, L.L., and Cui, T.J.: '基于数字编码超表面阵列的可编程衍射深度神经网络', Nat Electron, 2022, 5, (2), pp. 113–122[20] Chen, X.Q., Zhang, L., Liu, S., and Cui, T.J.: '基于时空编码数字超表面的到达方向估计与安全无线通信人工神经网络', Adv Opt Mater, 2022, 10, (23)[21] Shi, H.T., Wu, R.Y., He, S., Guo, X.Y., Bao, L., and Cui, T.J.: '基于宽带透射式可编程超表面的单传感器凝视成像', Photonics Res, 2025, 13, (11), pp. 3081–3089[22] Niu, H.X., An, J.C., Papazafeiropoulos, A., Gan, L., Chatzinotas, S., and Debbah, M.: '用于通感一体化的堆叠式智能超表面', Ieee Wirel Commun Le, 2024, 13, (10), pp. 2807–2811[23] Yang, H.Q., Wu, J.W., Shao, R.W., Wang, Z.X., Xu, H., Gao, Y., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '基于计算超表面的复矩阵方程求解器', Adv Funct Mater, 2024, 34, (11)[24] Bao, L., Wu, R.Y., Fu, X.J., and Cui, T.J.: '利用相位与振幅调制超表面控制透射近场的数学运算', Ann Phys-Berlin, 2020, 532, (6)[25] de Ceglia, D., Alù, A., Neshev, D.N., and De Angelis, C.: '利用非线性非局域平面光学进行模拟图像处理', Opt Mater Express, 2024, 14, (1), pp. 92–100[26] Zhang, L., Chen, X.Q., Liu, S., Zhang, Q., Zhao, J., Dai, J.Y., Bai, G.D., Wan, X., Cheng, Q., Castaldi, G., Galdi, V., and Cui, T.J.: '时空编码数字超表面', Nat Commun, 2018, 9[27] Zhang, L., Wang, Z.X., Shao, R.W., Shen, J.L., Chen, X.Q., Wan, X., Cheng, Q., and Cui, T.J.: '动态地

《利用2比特时域编码超表面实现任意多比特可编程相位》，Ieee T Antenn Propag，2020年，68，（4），第2984–2992页[28] Chen, X.Q.、Zhang, L.和Cui, T.J.：《用于时空编码数字超表面的智能自编码器》，应用物理快报，2023，122，（16）[29] Hu, Q.、Yang, W.X.、Wang, J.H.、Lu, X.C.、Zhao, J.M.、Jiang, T.、Chen, K.和Feng, Y.J.：《通过时空编码超表面动态生成具有按需极化的多种多波束》，Adv Opt Mater，2024，12，（6）[30] Dai, Z.H.、Zheng, Y.N.、Zhang, L.、Chen, X.Q.、Castaldi, G.、Cui, T.J.和Galdi, V.：《通过时空编码超表面联合控制辐射波与表面波》，Advanced Functional Materials，2025[31] Zhang, L.、Huang, Z.R.、Chen, X.Q.、Zheng, Y.N.、Liu, S.、Galdi, V.和Cui, T.J.：《用于时空编码数字超表面的互素调制及其超低散射特性》，Advanced Functional Materials，2024，34，（21）[32] Sun, Z.Z.、Zhang, L.、Chen, X.Q.、Xu, H.、Xiao, G.Y.、Zheng, Y.N.、Wu, Y.J.、Liu, Z.X.、Fu, H.S.、Zhou, X.Y.、Chen, Z.Y.、Chen, H.、Quan, Y. H.和Cui, T.J.：《基于超表面的反雷达》，Nat Commun，2025，16，（1）[33] Wu, G.B.、Dai, J.Y.、Cheng, Q.、Cui, T.J.和Chan, C.H.：《无边带时空编码超表面天线》，Nature Electronics，2022，5，（11），第808–819页[34] Wu, G.B.、Dai, J.Y.、Sun, Y.Q.、Shum, K.M.、Chan, K.F.、Cheng, Q.、Cui, T.J.和Chan, C.H.：《一种时空全息超表面天线》，Sci Adv，2025，11，（38）[35] Fang, X.Y.、Li, M.M.、Lai, Z.Y.、Ramaccia, D.、Toscano, A.、Bilotti, F.和Ding, D.Z.：《用于单一系统中到达方向估计与雷达散射截面调控的多功能时空调制超表面》，IEEE 微波理论与技术汇刊，2024，72，（6），第3797–3808页[36] Li, W.Z.、Qi, J.R.和Alu, A.：《利用时空调制计算超表面成像仪实现单像素超分辨率》，Photonics Research，2024，12，（10），第2311–2322页[37] Wang, X.Y.、Tong, M.S.和Zhao, L.：《用于目标识别的伪随机噪声序列时变反射超表面》，IEEE 微波理论与技术汇刊，2023，71，（8），第3446–3454页[38] Zhou, Q.Y.、Dai, J.Y.、Fang, Z.Q.、Wu, L.J.、Qi, Z.J.、Wang, S.R.、Jiang, R.Z.、Cheng, Q.和Cui, T.J.：《基于时空编码数字超表面的一般化高精度宽角度到达方向估计方法》，Ieee Internet Things，2024，11，（23），第38196–38206页[39] Chen, X.Q.、Zhang, L.、Zheng, Y.N.、Liu, S.、Huang, Z.R.、Liang, J.C.、Di Renzo, M.、Galdi, V.和Cui, T.J.：《基于时空编码超表面的通感一体化》，Nat Commun，2025，16，（1）[40] Peng, S.、Yu, Q.、Shen, X.Y.、Xie, Y.T.、Zhang, H.、Ma, J.、Fu, X.J.、Wu, J.W.和Yang, F.：《基于波导馈电时空编码超表面的毫米波无线收发机设计与实现》，Acs Appl Electron Ma，2025，7，（16），第7802–7810页[41] Yao, H.M.、Zheng, H.R.、Li, B.、Zhang, Z.D.、Xu, J.C.、Gao, S.、Guo, Y.S.和Bi, K.：《用于谐波调制和无线通信应用的低剖面可编程超表面天线》，Ieee T Antenn Propag，2025，73，（3），第1406–1413页[42] Fang, X.Y.、Li, M.M.、Zheng, X.Z.、Vandenbosch, G.A.E.和Ding, D.Z.：《通过多种码频联合调制超表面建立无线安全通信链路》，Ieee Internet Things，2025，12，（16），第34273–34282页[43] Zhang, L.、Chen, M.Z.、Tang, W.K.、Dai, J.Y.、Miao, L.、Zhou, X.Y.、Jin, S.、Cheng, Q.和Cui, T.J.：《基于数字超表面的空分与频分复用无线通信方案》，Nature Electronics，2021年，4，（3），第218–227页[44] Zhang, L.、Huang, Z.R.、Chen, X.Q.、Zheng, Y.N.、Liu, S.、Galdi, V.和Cui, T.J.：《用于时空编码数字超表面的互素调制及其超低散射特性》，Advanced Functional Materials,

2024，34，（21）[45] Qian, C.、Jia, Y.T.、Wang, Z.D.、Chen, J.T.、Lin, P.J.、Zhu, X.Y.、Li, E.R.和Chen, H.S.：《结合随机演化学习的自主空天两栖隐形斗篷》，先进光子学，2024，6，（1）[46] Zhang, N.、Chen, K.、Hu, Q.、Zhao, J.M.、Zhao, J.M.、Jiang, T.和Feng, Y.J.：《用于控制电磁波散射的时空超表面》，物理评论应用，2022，17，（5）[47] Fang, X.Y.、Li, M.M.、Lai, Z.Y.、Ramaccia, D.、Toscano, A.、Bilotti, F.和Ding, D.Z.：《用于单一系统中到达方向估计与雷达散射截面调控的多功能时空调制超表面》，IEEE 微波理论与技术汇刊，2024，72，（6），第3797–3808页[48] Jiang, L.X.、Li, Y.F.、Yang, H.、Yan, M.B.、Jiang, J.M.、Zhang, Y.W.、Qin, Z.、Yang, W.W.、Chen, H.Y.、Pang, Y.Q.、Guo, Z.H.、Zheng, L.、Wang, J.F.和Qu, S.B.：《借助单一时空编码辐射-散射超表面实现波束扫描、超低旁瓣及带内超低散射特性》，Advanced Science，2025，12，（11）[49] Wu, G.B.、Dai, J.Y.、Shum, K.M.、Chan, K.F.、Cheng, Q.、Cui, T.J.和Chan, C.H.：《用于独立控制任意谐波阶次的合成移动包络超表面天线》，Nat Commun，2024，15，（1）[50] Zheng, Y.N.、Zhang, L.、Chen, X.Q.、Rossi, M.、Castaldi, G.、Liu, S.、Cui, T.J.和Galdi, V.：《利用时空编码调制对可重构智能表面进行快速诊断》，Advanced Functional Materials，2025[51] Chen, X.Q.、Zhang, L.、Zheng, Y.N.、Zhu, B.B.、Rossi, M.、Castaldi, G.、Liu, S.、Galdi, V.和Cui, T.J.：《用于可重构智能表面低复杂度诊断的非均匀时空编码调制》，Advanced Electronic Materials，2025[52] Han, J.Q.、Wang, T.、Chen, S.L.、Ma, X.J.、Li, G.X.、Liu, H.X.和Li, L.：《利用时空编码透射超表面，在无相位近场微波计算成像中使用谐波》，应用物理快报，2023，122，（3）[53] Xia, D.X.、Han, J.Q.、Mu, Y.J.、Guan, L.、Wang, X.、Ma, X.J.、Zhu, L.H.、Lv, T.G.、Liu, H.X.、Shi, Y.、Li, L.和Cui, T.J.：《基于卷积神经网络近场定位和双频超表面的自适应无线供电网络》，Nat Commun，2024，15，（1）[54] Rajabalipanah, H.、Abdolali, A.、Iqbal, S.、Zhang, L.和Cui, T.J.：《通过时空数字超表面实现模拟信号处理》，纳米光子学，2021，10，（6），第1753–1764页