

特色专题

智能超表面太赫兹波控制技术研究进展

司黎明^{1,2,3,4,5}, 汪京生^{1,2}, 牛荣^{1,2}, 党晨阳^{1,2}, 王钊睿^{1,2}, 鲍秀娥^{1,2,3}, 李琰⁵, 孙厚军^{1,2,3}, 朱卫仁⁶

摘要 太赫兹波在第6代移动通信(6G)、生物医学成像与传感等领域具有重要应用潜力,而超表面为太赫兹波的高效调控提供了新的实现路径。综述了太赫兹智能超表面的研究现状与发展趋势,主要总结了机械重构、光电材料调谐、相变材料切换、集成半导体器件及可编程控制等实现路线,人工智能在太赫兹超表面逆向设计、自适应环境交互、多模态感知与智能分析中获得应用,并归纳了其在太赫兹成像、生物医学检测、6G及国防安全等方面的代表性应用。太赫兹智能超表面正由单一功能器件向集成感知、决策与控制的系统化平台演进,但仍面临器件损耗敏感、前端传感硬件不足、阵列级驱动与封装复杂、加工一致性要求高,以及统一测试评价体系缺乏等关键问题。未来研究应重点围绕低损耗可调材料、高灵敏感知前端、阵列级协同集成、系统原型验证及标准化评价方法展开,以推动太赫兹智能超表面由原理验证进一步走向稳定工程应用。

关键词 太赫兹;超表面;人工智能;智能电磁控制

太赫兹波段(0.1~10 THz)介于微波与红外之间,是电子学向光子学过渡的关键区域。早期,微波与红外技术已相对成熟,而对二者之间的太赫兹波段认知有限,形成了所谓的“太赫兹空白”。近年来,随着电子学与光子学等技术的持续进步,太赫兹波的独特优势逐渐凸显,其带宽大、能量转换效率高,在通信领域潜力巨大,有望成为第6代移动通信(6G)的关键技术之一^[1-2]。同时,太赫兹波兼具物质穿透性与指纹谱识别特性,在生物医学传感^[3]、通信^[4]和成像^[5]等领域展

现出广阔应用前景。传统的太赫兹波束调控方式,如机械扫描透镜^[6]、相控阵^[7]、基于频率扫描的波束控制和多波束交换技术^[8]等,普遍存在器件体积大、损耗高、成本昂贵及系统复杂等问题。因此,有必要探索更加灵活的智能电磁控制技术。

超表面作为一种新兴的二维人工电磁结构,可以灵活控制电磁波的幅度、相位和极化等基本特性^[9-11],为上述问题的解决提供了新思路。2011年,Yu等^[12]提出广义斯涅耳定律,将其引入超表面中,并设计了一种V型超表面单元,通过调整单元的臂长和夹角来控制透射相位的变化,并通过梯度相位分布实现了异常折射等效果。2014年,Cui等^[13]进一步提出了数字编码和可编程超表面,显著提升了电磁波控制的灵活性。近年来,太赫兹超表面在生物传感^[14]、成像^[15]等领域的研究日益深入,应用范围不断拓展。与此同时,人工智能(artificial intelligence, AI),尤其是深度学

1. 北京理工大学集成电路与电子学院,北京 100081

2. 临近空间环境特性及效应全国重点实验室,北京 100081

3. 北京理工大学唐山研究院,唐山 063000

4. 毫米波全国重点实验室,南京 210096

5. 深圳北理莫斯科大学工程系,深圳 518172

6. 上海交通大学集成电路学院,上海 200240

收稿日期:2026-02-27;修回日期:2026-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(62271056, 62571049, 62171186, 62201037);国家市场监督管理总局专项(AKYKF2423);北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目(L222042);河北省自然科学基金项目(F2025105029);毫米波国家重点实验室开放课题项目(KN20250214);高等学校学科科研创新引智计划项目(B14010)

作者简介:司黎明,教授,研究方向为电磁场与微波技术,电子信箱:lms@bit.edu.cn

引用格式:司黎明,汪京生,牛荣,等.智能超表面太赫兹波控制技术研究进展[J].科技导报,2026,44(9):43-61;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2026.03.00018

习技术的跨越式发展,为实现超表面更高效的设计、更复杂的控制,以及更智能的应用提供了关键工具。AI技术已从早期的符号逻辑,演进至以数据驱动为核心的新范式,并在视觉、语言等领域展现出超越传统方法的性能。

本文综述太赫兹智能超表面在波前控制方面的最新进展。超表面技术从静态被动控制,经历动态控制阶段^[8],发展到如今集成了AI技术的自动控制超表面,如图1所示,超表面在太赫兹波束控制方面的能力持续提升,并呈现多样化发展趋势。动态可重构超表面的实现方法多样,包括机械、电控、光控及基于相变材料等多种方式。结合现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)等控制技术,超表面具备了可编程能力,从而实现了多功能性与灵活性。同时,AI算法极大地优化了超表面单元结构的设计流程,显著缩短了研发周期。进一步融合算法与硬件的智能超表面系统,更具备了自适应、可编程的先进控制能力。

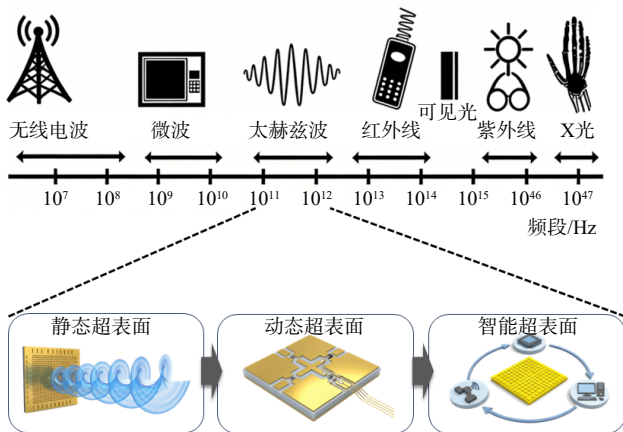


图1 太赫兹超表面波前控制技术

1 太赫兹超表面的动态控制

1.1 超表面的波束控制能力

超表面是一种由周期性或准周期性天线单元构成的人工超薄电磁界面,其厚度通常小于工作波长。这种亚波长结构不仅能实现对电磁波幅度、相位和极化状态的精确控制,还具有体积小、易于集成等优势。通过对单元结构及其排布进行精心设计与优化,研究人员能够实现对波束的精确控制,图2^[16-19]展示了超表面控制波束的研究成果。Yang等^[16]设计了一

种由硅立方体复合晶格组成的超光栅,可在衍射锥上实现效率接近100%的大角度异常反射,通过相干抑制不必要的衍射级次来高效率地控制异常太赫兹光束,并分别针对斜入射和正入射情况设计了双分区和三分区结构。Nie等^[17]提出了一种基于二氧化钒(VO_2)的太赫兹超表面,当 VO_2 处于金属态时,利用4个优化单元实现完整相位覆盖,并保持较高的偏振转换效率;在相变后,上述调控能力随之关闭,从而实现波束方向与涡旋相位功能之间的动态切换。Wang等^[18]将固定的、高性能的超表面光学元件与可控制的光子芯片集成,通过切换输入端口赋予系统动态调控光束的能力。Jiang等^[19]提出一种级联超表面的机械控制平台,通过多层超表面的相对旋转实现动态波前调控,其实验系统中旋转平台的转速可调范围达 $0^\circ\sim 360^\circ/\text{s}$,角度分辨率为 0.05° ,从而支持传播波到表面波的连续、动态且方位角可控的波束转向。

超表面能够实现异常反射与折射、波束偏转、聚焦成像,以及涡旋波生成等多种波束控制功能。随着单元结构设计、相位调控方式和阵列构型的不断发展,太赫兹超表面的波束控制能力正由单一功能向多功能协同调控拓展,为后续动态可重构与智能控制超表面的发展奠定了基础。

1.2 可重构超表面

太赫兹波段在6G通信、成像与传感等领域具有重要应用价值,但其波前控制仍缺乏快速、灵活的技术手段。传统方法如机械扫描速度慢,相控阵系统则存在复杂、功耗高等问题,难以满足高集成度与动态响应的需求^[6-8]。可重构超表面通过调制单元的电磁响应,实现了状态切换与功能重构,为动态波前控制提供了一种低功耗且可扩展的解决方案。表1总结了可重构超表面的主要技术路径,包括机械控制^[20-22]、光电材料控制^[23-29]、相变材料控制^[30-31]及集成半导体元件控制^[32]等几类。这些技术共同构成了太赫兹超表面由静态器件走向动态器件的实现基础。

1.2.1 机械可重构超表面

通过改变超表面的机械结构,如旋转、平移或调节层间间距,能够有效改变其电磁特性,从而在较宽频带内实现功能的可重构。其中,基于旋转的可重构是一种极具潜力的技术路径,它无须复杂的有源电控元件即可实现高效的波前控制。Cai等^[20]提出了一种

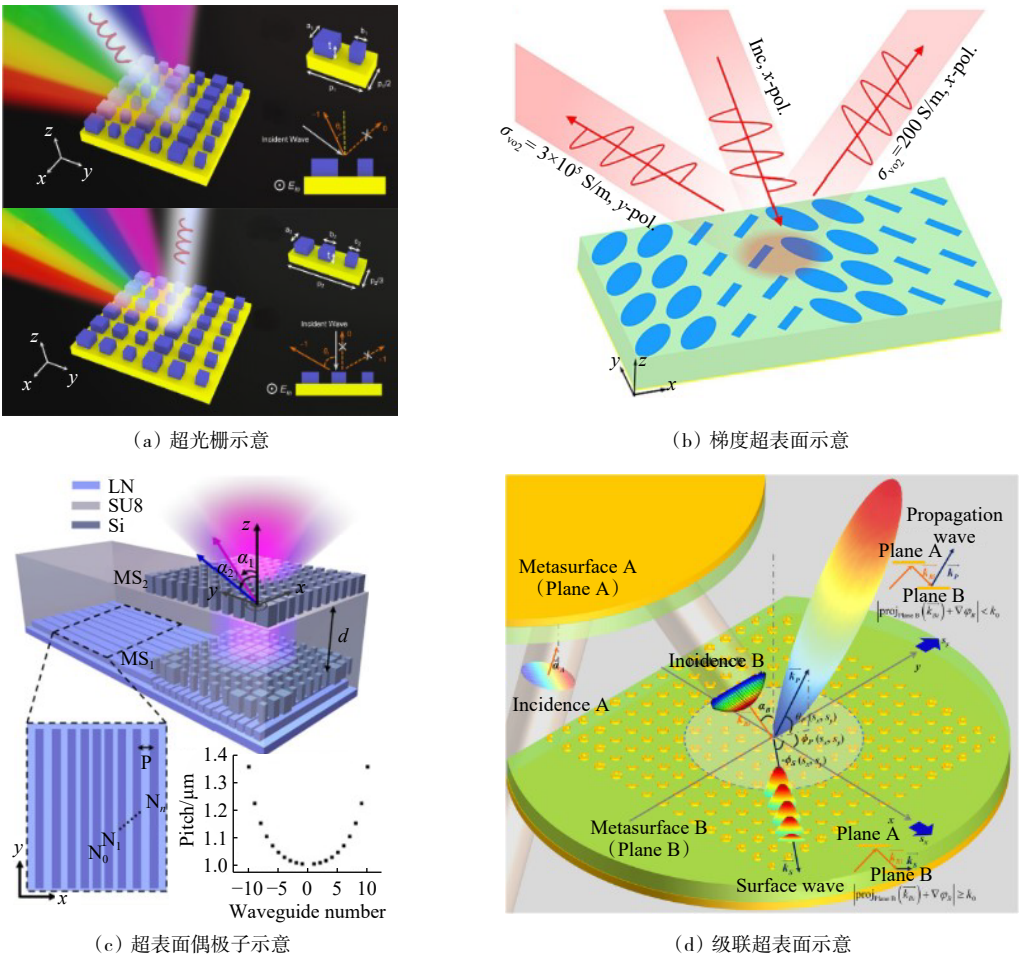


图 2 超表面波束控制

表 1 太赫兹可重构超表面主要技术路径的对比

控制方法	控制机制	响应速度	调制深度
机械控制 ^[20-22]	超表面结构变化(旋转、平移、间隙变化)	机械调节, 响应相对较慢	目标方向调制能力通常为几十个百分点到约60%, 偏转角可达40°以上
光电材料控制 ^[23-29]	材料电磁参数连续调谐	电调或光泵浦调控, 响应较快	幅度调制通常为30%~50%, 优化设计可提升至70%~80%, 个别石墨烯结构接近100%
相变材料控制 ^[30-31]	材料相变导致的折射率跳变	光激发响应快, 热/电驱动通常较慢	幅度调制通常大于50%, 优化设计可接近100%, 适合大反差开关式功能重构
半导体元件控制 ^[32]	电路控制半导体元件状态	集成半导体元件, 响应速度快	相位调制范围可达180°~210°以上, 波束扫描能力可达±45°左右

基于级联透射超表面的方法, 通过旋转 2 层介质超表面实现太赫兹波前的动态调控。该工作在 0.7 THz 实现了连续波束扫描, 总扫描角度达到 42°; 其中, 每一层超表面均可实现约 19.3°的异常偏折。该方法实现了对入射太赫兹波前和极化的控制, 适用于偏振调控或偏振复用场景。Cheng 等^[21]则通过机械旋转两层级联超光栅, 实现了太赫兹波束在传输半空间内的连续全向扫描。实验结果表明, 该器件在 0.14 THz 可实现

平均 41.4% 的传输效率, 单波束和双波束扫描可覆盖 1.56π 的立体角范围, 对应最大仰角达到 $\pm 77^\circ$ 。与小角度衍射设计相比, 该方案的扫描速度提高了 2 倍以上, 体现出双衍射超光栅在大范围、快速波束扫描方面的优势。

调节超表面单元与接地平面之间的空气间隙也是一种高效的动态波束控制手段。Sun 等^[22]基于此原理研制了一种太赫兹偏转器, 可以动态控制异常反射

波的强度与偏转角度。该超表面由金属谐振器阵列芯片、镀金硅衬底、微型音圈电机和 3D 印刷骨架结构组成,如图 3(a)^[22]所示。图 3(b)^[22]展示了单元控制波束的效果,当金属谐振器阵列和金接地面之间的空气间隙大小发生改变时,波束会发生相应的偏转。这种间隙控制方法在保持高效率的同时,进一步提升了控制的连续性与精度,实验结果表明,当空气间隙为 50 nm 时,该器件在 0.61 THz 处的最大偏转系数达到 0.60,对应偏转角约为 44.5°;进一步引入微型音圈电机后,器件在目标偏转方向上的调制深度可达到约 62.5%。上述结果表明,间隙调控方式能够在保持较高偏转效率的同时,实现太赫兹波束方向和强度的连续动态调节。该工作为太赫兹频段动态波束控制提供了可靠的器件实现路径。

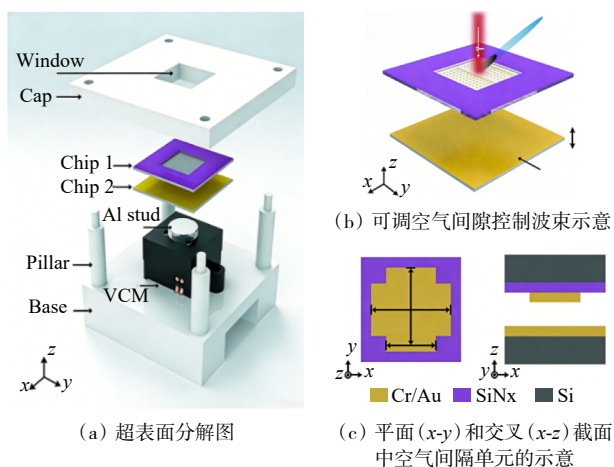


图 3 机械可重构超表面

1.2.2 光电材料可重构超表面

光或者电控制方式实现的可重构超表面响应速

度快,精度高。石墨烯是一种超薄材料,可以通过栅极电压控制其费米能级,动态改变其表面电导率与电磁响应,从而实现谐振频率连续可调。Liu 等^[23]设计了基于电磁感应透明(electromagnetically induced transparency, EIT)效应的单像素可重构石墨烯超表面,如图 4^[23]所示,该超表面电可调,超表面利用了石墨烯电导率随费米能级变化的特性,通过双通道电压的协同控制实现对 EIT 共振的宽带调谐,动态地控制透射波的相位和振幅。实验结果表明,该可重构石墨烯超表面可实现约 1.5 THz 的超宽带太赫兹指纹增强感知,对痕量分析物的检测限低至 0.64 $\mu\text{g}/\text{mm}$,相较裸基底检测方法可获得最高 17.4 dB 的信号增强,从而显著提升了对手性药物异构体和疾病标志物分子的检测与识别能力。Sun 等^[24]设计的超表面单元由开口谐振环和纳米棒构成,谐振环和纳米棒形成电感-电容(inductor-capacitor, LC)共振耦合,能够有效增加石墨烯费米能级变化对单元电磁响应的影响效果。该超表面采用单层石墨烯作为控制材料,通过调节其费米能级以改变介电常数,进而实现单元电磁响应控制。在此基础上,通过控制各单元间的相位差可实现波束偏转,构建反射式超表面透镜;控制单元相位分布,则可实现焦距可调的聚焦功能。

液晶是另一类广泛应用的电可调材料,可以通过电压来精确控制其棒状分子排列方向,从而改变光线穿过液晶层时的折射率,最终实现对波束相位、振幅或偏振态的控制。Deng 等^[25]提出了一种基于液晶的可重构反射式极化转换器,该器件能在同一宽带频率范围内实现线性极化波到交叉极化波或圆极化波的

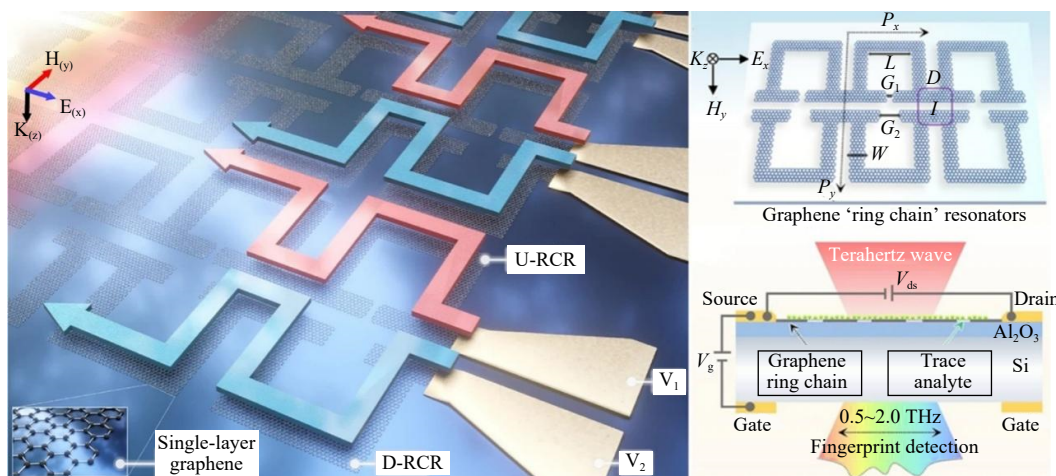


图 4 石墨烯可重构超表面示意

动态切换。Vasić等^[26]利用液晶与金属-绝缘体-金属谐振腔耦合的可重构超表面,在太赫兹频段实现了可调波束偏转。Shen等^[27]展示了如图5^[27]所示的可重构智能表面,该超表面是基于液晶材料设计的,实现了对太赫兹波束的灵活控制。所提出的液晶可重构智能表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)在0.28 THz附近可实现3 bit量化相位状态及近270°的最大相移,支持波束指向、波束数目及波束宽度的动态重构。实验与仿真结果表明,该器件可实现单波束在5°~55°范围内的连续控制。

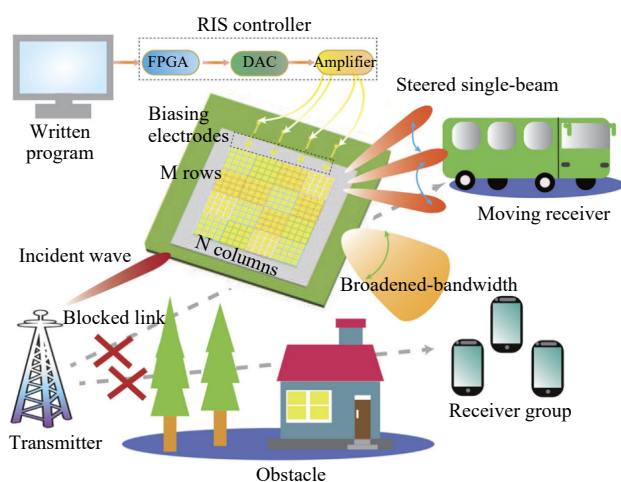


图5 基于液晶 RIS 的太赫兹波束重构系统模型

光敏材料也具有控制潜力,其电导率可以通过泵浦光的能量来调制。当光能变化时,半导体内的载流子浓度也随之变化,导致电导率发生变化。Iyer等^[28]通过光泵浦在InSb谐振器中注入自由载流子,改变其复折射率,从而调谐电偶极子与磁偶极子的共振频率。研究者实现了在保持低损耗的前提下达成散射相位0°~360°范围的连续调谐,进而实现可重构的波束控制。此外,Tan等^[29]将InSb作为衬底材料,利用外加磁场控制其性质,结合各向异性相位梯度超表面实现了波束偏转与偏振转换,通过相位调制的设计与外加磁场的动态控制,完成了太赫兹波束的单向传输功能。

1.2.3 相变材料可重构超表面

相变材料(phase-changing materials, PCM)能够在外部刺激下发生可逆相变并伴随折射率的显著变化,这种方式实现的可重构超表面调制幅度大,状态变化明显。VO₂是一种典型的相变材料,其导电特性

可在绝缘态与金属态之间切换。Zhang等^[30]设计的超表面能够用作一种可开关的多功能太赫兹光子器件,如图6^[30]所示。该超表面单元由Gold-VO₂分裂谐振环(GV-SRR)和Gold-VO₂分裂谐振矩形长条(GV-SRO)组成,开口处均由VO₂填充。通过外部场刺激,可以切换VO₂的状态,处于绝缘态或者导体状态时,结构将相应地获得或者失去偏振转换和相位调制功能。该超表面实现了波束调控、聚焦成像、偏振转换等功能。

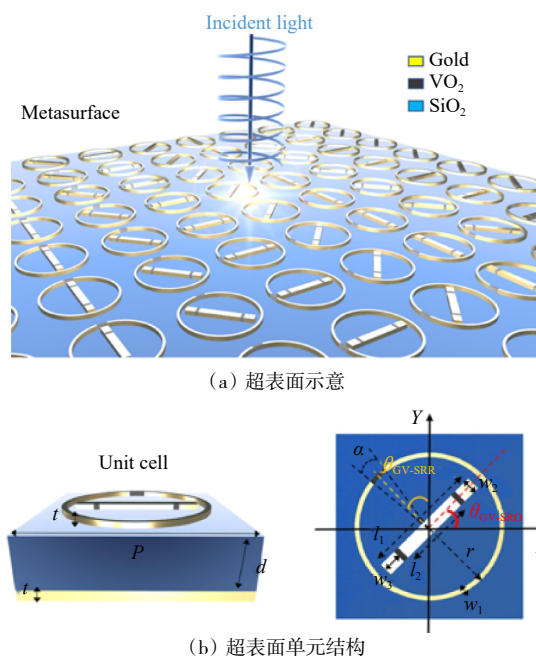


图6 基于VO₂制作的VO₂可重构超表面

锗碲化物(Ge₂Sb₂Te₅, GST)是另一类重要的相变材料,在加热到一定温度后会改变结晶状态,折射率发生可逆的变化。Abdollahramezani等^[31]提出了一种超表面的设计方案,将钨加热器与基于GST的等离子体超表面进行单片集成,如图7^[31]所示。这一设计成功在近红外波段实现了优秀的综合性能:绝对反射率调制深度高达80%、准连续光谱调谐范围超过250 nm,并具备非易失性和多稳态(超过4个中间态)切换能力。研究者演示了该平台可用于构建动态光束偏折器,通过电信号改变GST状态,即可将入射光在镜面反射(0级)与异常反射(+1级)之间进行切换。这项工作为开发高性能、可集成、电寻址的动态超表面光学器件奠定了坚实的物理与工艺基础。

1.2.4 集成半导体元件可重构超表面

将变容二极管、肖特基二极管等有源半导体元件

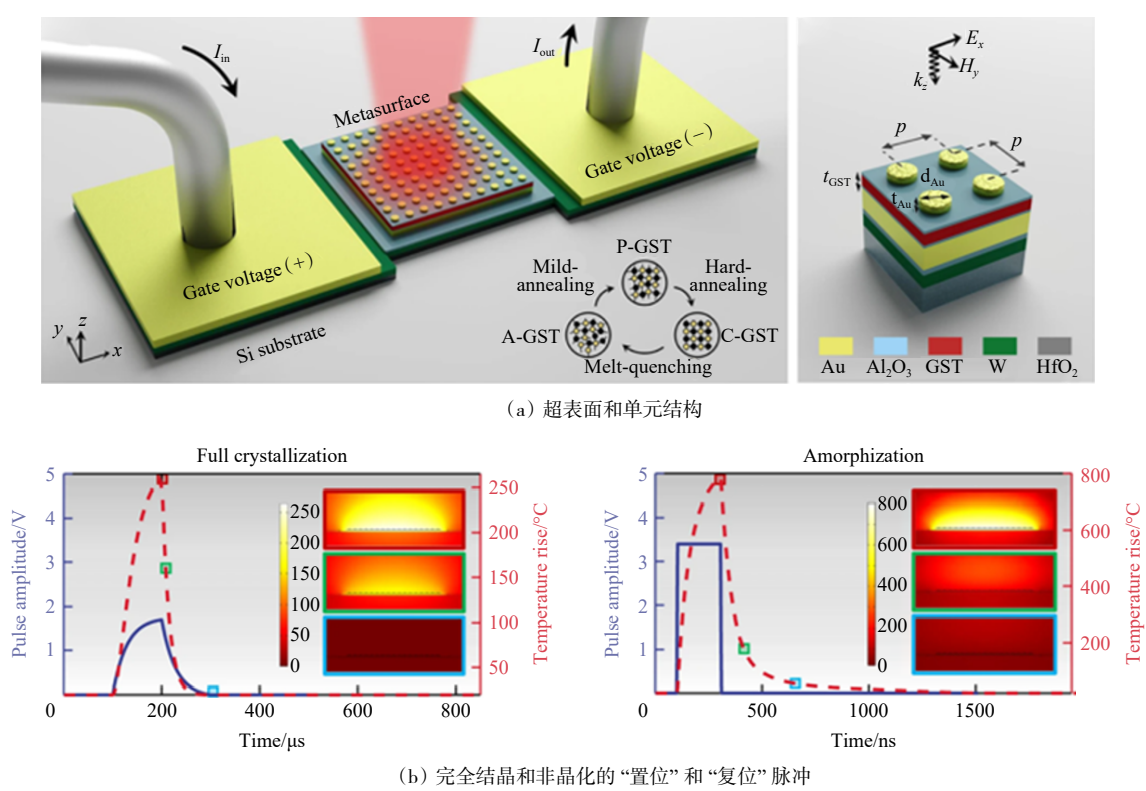


图 7 基于 GST 制作的可重构超表面

集成到超表面中,是实现动态调谐、状态切换并保持高频低损耗特性的有效方法。Yu 等^[32]提出一种基于氮化镓肖特基势垒二极管(GaN Schottky barrier diode, GaN SBD)的动态可调太赫兹超表面,如图 8^[32]所示。其单元结构由太赫兹天线、GaN SBD、衬底、金属反射层及顶部 2 条控制线构成,其中, GaN SBD 作为电压控制移相器,通过偏置电压调节结电容(C_j)来改变

表面阻抗与谐振模式。通过采用基于差分进化的波束成形优化算法,该超表面在模拟与数字模式下均实现了 $\pm 45^\circ$ 范围的波束扫描,主瓣增益最高分别达到 18.5 与 16 dBi。超表面阵列实现了连续的宽相位调制,平均相位误差低,插入损耗低,调制速度快,体现了 GaN SBD 在高精度、高速连续太赫兹相位调制与波束控制中的应用潜力。

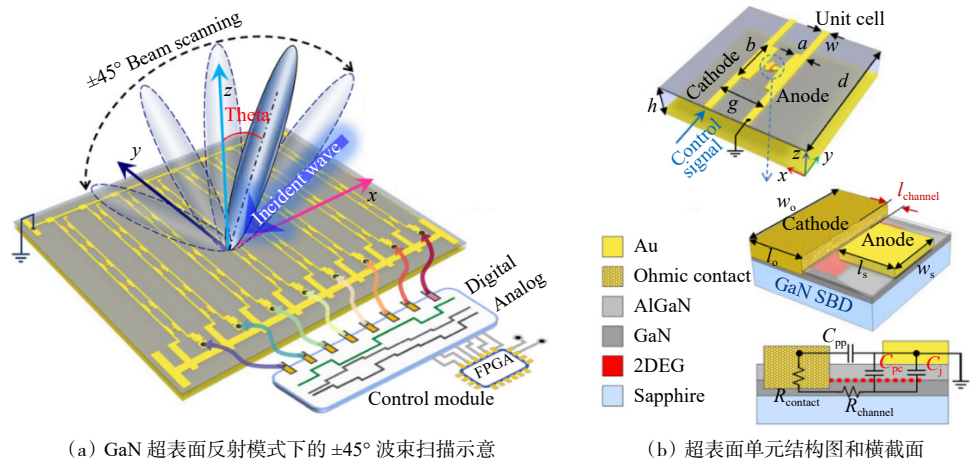


图 8 基于 GaN SBD 的超表面

总体而言,太赫兹可重构超表面的主要技术路线可归纳为机械重构、光电材料调谐、相变材料切换及

半导体有源器件集成 4 类。机械方法调制范围较大、实现直观,但响应速度和系统紧凑性受限;光电材料

方法具有较高调控精度和连续性,但在偏置结构和封装上要求较高;相变材料方法调制幅度大、状态反差明显,适合开关式功能重构;半导体器件集成方法则更利于片上实现和高速驱动。现阶段,该领域的发展重点已由“单元可调”逐步转向“阵列级一致性、低损耗互连和系统级集成”。在此基础上,研究进一步发展出面向阵列级控制的可编程实现路径,使超表面由“可调器件”进一步走向“可控系统”。

1.3 可编程超表面

在具备动态调控能力之后,太赫兹超表面的研究进一步由单元级响应调节发展到阵列级状态编码与实时控制,通过将不同功能对应的超表面状态进行编码并储存在现场 FPGA 中,利用 FPGA 进行实时动态控制,可进一步实现超表面的现场可编程,使其能够灵活、实时地控制电磁波并执行多种功能。Lan 等^[33]提出了一种基于 AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 (high electron mobility transistor, HEMT) 与二维电子气 (two-dimensional electron gas, 2DEG) 的可编程太赫兹超表面,其非对称谐振单元通过栅极电压调控载流子浓度,在 0.34 THz 处实现了 1 bit 的相位编码,相位差接近 180°,该超表面示意如图 9^[33]所示。该器件由 FPGA 实时控制编码序列,支持多种波束赋形策略。实验表明,该超表面在 0.33~0.40 THz 频带内可实现 20°~60° 的宽带宽角波束扫描,角度精度达 1°,同时具备多波束生成功能与基于 Golay-Rudin-Shapiro 编码实现的扩散散射功能,功能切换速度达 100 MHz。研究进一步展示了基于实时波束追踪的点对点太赫兹信号传输系统,验证了其在动态太赫兹通信链路的应用潜力。该工作为高速、高精度的太赫兹波前控制提供了集波束扫描、多波束赋形与散射控制于一体的多功能可编程硬件平台。

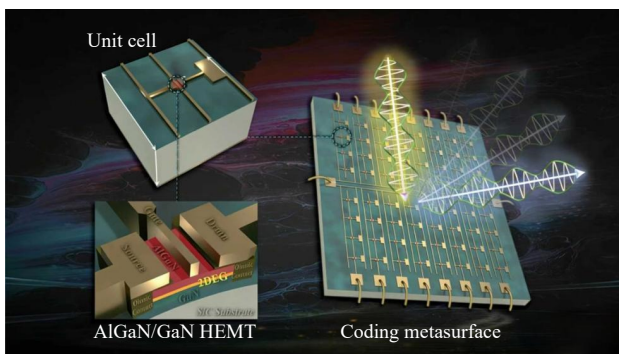


图 9 实时可编程超表面示意

Wang 等^[34]设计了一种太赫兹波段可编程超表面,在每个单元中集成 2 个 HEMT 开关,通过编程控制 4 种开关状态 (on-on、on-off、off-on、off-off) 的组合,可独立设定单元工作在反射或透射模式,并同时实现 1 bit 相位调控。其设计采用极化分配机制,在单一极化入射下,利用偶极共振原理和几何相位原理分别控制反射波相位和透射波相位,从而实现对反射波与透射波方向的实时、独立编程控制。研究团队在 0.14 THz 频段成功演示了面向移动接收器的实时波束跟踪,稳定传输了 1080 p/30 fps 的高清视频流。Guo 等^[35]提出了一种基于 VO₂ 的透射式可编程太赫兹超表面。该器件由可独立寻址的像素阵列构成,每个像素可通过外部 FPGA 实时编程控制,实现对透射太赫兹波的空间幅度调制。通过将 VO₂ 薄膜转移至超薄柔性衬底上,该可编程超表面在宽带范围内实现了高效的透射调制,并在弯曲状态下保持稳定的可编程性能。基于其独立寻址能力,该超表面可实时生成多种空间编码图案,并成功在太赫兹波段实验验证了双层级联架构下的可编程矩阵乘法运算。

用可编程微控制器 (microcontroller unit, MCU) 对阵列中的单元进行编码同样是一种实现超表面可编程的方法,Tian 等^[36]提出了一种基于非线性相位调制的可编程超光栅 (图 10)。该器件是通过 MCU 对集成变容二极管的单元施加可编程电压分布,从而在硬件层面实时合成所需的非线性相位分布。该工作在同一平台上实现了大角度波束扫描与杂散谐波抑制、双波束任意功率分配及多通道逆向反射等功能,展示了强大的现场可编程与波前重构能力。此外,Guo

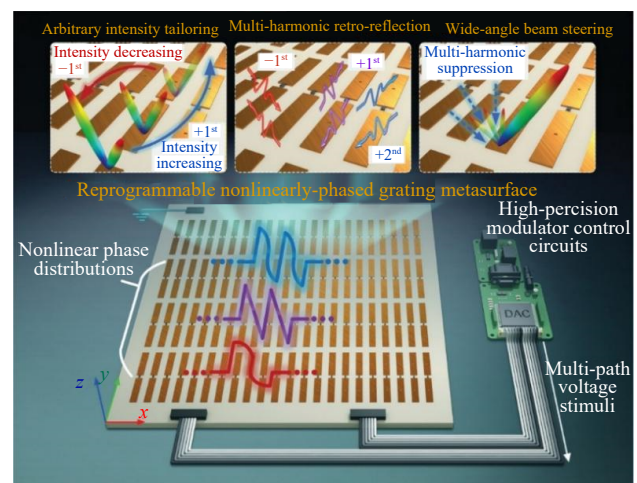


图 10 可编程非线性相位光栅超表面(RNPGM)示意

等^[37]提出一种可编程太赫兹超表面,直接集成条形电极,对超表面每一行单元施加独立的偏置电压。该器件可通过调节单元上2个石墨烯贴片的费米能级差异,在连续调幅与相位切换2种模式间灵活转换,实现对单元交叉极化透射响应的可编程控制。进一步地,通过编码不同行的电压状态序列,构建了可编程的太赫兹光栅与非涅尔波带片,验证了其对透射波束偏转角度与聚焦位置的动态控制能力。

1.4 太赫兹超表面加工

太赫兹超表面的性能不仅取决于单元设计与调控机制,也与加工精度、材料沉积质量,以及阵列级集成能力密切相关。总体而言,太赫兹超表面的加工通常依赖掩膜光刻、电子束曝光、薄膜沉积、刻蚀、纳米压印等微纳工艺;对于复杂三维结构或大面积器件,近年来两光子聚合、3D打印等方法也逐渐受到关注。由于太赫兹超表面单元尺寸通常处于数微米至数百微米量级,因此,在工艺选择上需要在分辨率、加工面积、制造成本与器件一致性之间取得平衡。现有工作指出,太赫兹超表面走向实际应用的关键仍在于实现大面积、均匀且高精度的微纳结构制造,并提升与柔性衬底、偏置网络和有源器件的兼容能力^[38]。

针对不同材料体系,加工与集成路线也存在明显差异。对于相变材料超表面,Abdollahramezani等^[31]通过在GST超表面下方集成微加热器,实现了电寻址相变调控,并获得了80%的器件效率,说明相变材料路线已经具备较好的单片集成潜力。对于液晶与柔性可编程超表面,Fu等^[39]提出了液晶集成的太赫兹可编程超表面,表明液晶层封装、电极引出和柔性支

撑结构已成为器件实现中的重要技术路径。此外,在大规模集成方面,Venkatesh等^[40]基于65 nm CMOS工艺构建了平铺芯片式太赫兹全息可编程超表面,器件包含576个可独立寻址的元单元,支持8 bit数字控制和GHz量级的工作速度,这说明半导体工艺兼容的大规模集成正逐步成为太赫兹智能超表面系统化发展的重要方向。未来太赫兹超表面的加工技术将不仅关注单个单元的精细制备,还需要进一步面向大面积阵列的一致性、低损耗互连、驱动封装以及系统级协同集成展开优化。

2 智能驱动的太赫兹超表面

随着可重构与可编程技术在太赫兹波前调控中的不断发展,超表面已由早期的静态响应器件逐步演进为可实时调节的动态电磁平台,为太赫兹波的灵活控制奠定了基础。在此基础上,AI技术的引入进一步推动了太赫兹智能超表面的发展,使其形成了“可重构硬件-智能算法-应用系统”相结合的研究框架。表2总结了AI技术在太赫兹智能超表面中的应用。具体而言,AI不仅可用于超表面单元和阵列的逆向设计,缩短结构优化周期、提升设计效率,还可与传感器、控制电路和决策算法协同构建具备“感知-决策-控制”能力的智能系统。需要指出的是,微波频段在系统级闭环控制、人机交互和多目标协同方面已积累较多研究基础,而太赫兹频段由于工作波长更短、材料损耗与色散更敏感、阵列寻址和前端集成难度更高,在实现路径上具有更强的频段特异性。

表2 AI在太赫兹智能超表面中的应用

应用方向	关键技术	技术价值	在太赫兹波段的技术难点
超表面逆向设计 ^[41-47]	深度学习、神经网络	快速生成最优几何参数	缺乏涵盖太赫兹材料特性的高质量数据集
自适应环境交互 ^[48-50]	强化学习、传感器	自主学习最优调控策略	太赫兹传感器稀缺,环境反馈信号弱、噪声大,实时闭环难
多模态人机交互 ^[51-56]	计算机视觉、语音识别	实现人机交互控制	太赫兹成像与通信硬件和交互算法尚未深度融合,系统架构待探索

2.1 AI赋能超表面设计

超表面的设计过程通常分为2个阶段:单元设计与阵列排布。传统的设计过程主要采用时域有限差分等正向预测算法,结合人工参数优化,非常依赖于

参数扫描与仿真,这种方法非常耗时且效率低下。此外,由于在单元设计过程中常使用周期性边界条件,而在实际阵列中存在非周期性耦合,这导致了理论设计与实际性能之间的偏差。为解决上述问题,AI技术

被引入超表面设计流程。通过深度学习方法, AI 模型能够从大量已知数据中学习结构参数与电磁响应之间的复杂映射关系, 并且能够直接预测满足目标性能的超表面结构, 显著减少单元与阵列设计所需的时间与计算资源。因此, AI 技术为超表面的逆向设计与性能预测提供了一种高效、智能化的新途径。

Niu 等^[41]提出一个混合 AI 网络框架, 该框架协同串联神经网络(tandem neural network, TNN)与深度 Q 网络(deep Q-network, DQN)。所设计框架的流程如图 11^[41]所示, 首先, TNN 直接从目标宽带吸收与极

化转换性能出发, 逆向生成单元的最优几何参数。其次, DQN 将阵列排布问题构建为强化学习任务, 以最大化雷达散射截面(radar cross section, RCS)缩减带宽为目标, 通过智能体与环境的交互, 自主搜索最优的“0/1”编码图案。该方法创新地将连续参数优化与离散排列搜索融合在同一流程中, 实现了结构与排布的联合全局优化。基于此框架设计出的超表面, 在超宽频带内具有卓越的性能, 该工作实现的单元和阵列的端到端逆向设计, 为复杂功能超表面的智能化设计提供了高效路径。

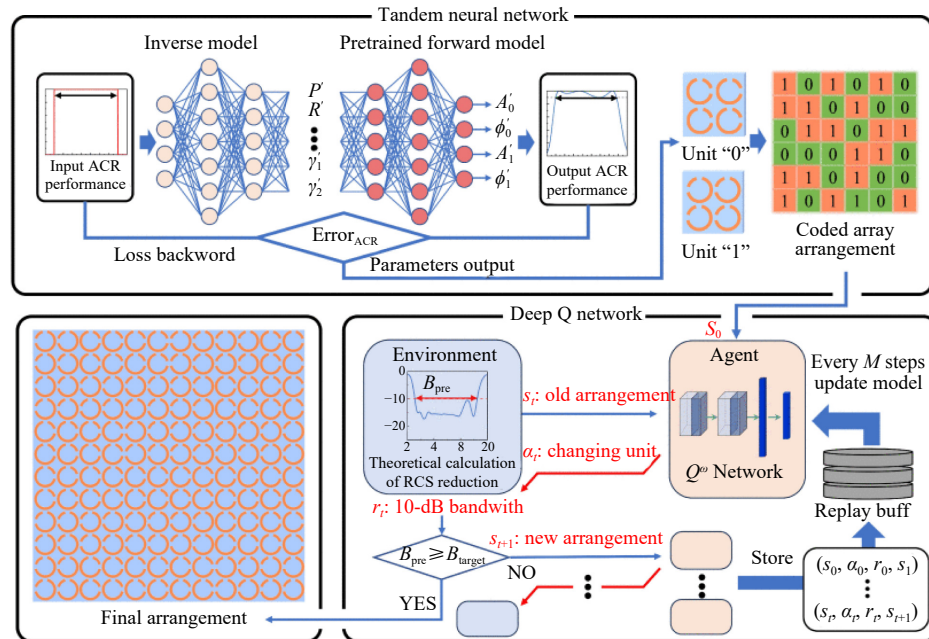


图 11 基于混合人工智能神经网络的超表面逆向设计框架

为克服传统深度学习模型在超表面逆向设计中存在的“黑箱”问题, Khatib 等^[42]构建了物理注入式 Lorentz 神经网络, 将描述材料电磁响应的 Lorentz 振子模型作为物理约束嵌入网络输出层。这一设计使网络直接学习并输出底层物理参数, 而非简单拟合“几何-频谱”映射, 显著提升了模型的可解释性。此外, 超表面研究中完整时域信号的获取往往需要大量仿真或实验时间, 且受限于时间窗口导致精度不足。针对此问题, Tang 等^[43]提出了基于物理信息的级联门控循环单元(gate recurrent unit, GRU)网络, 通过两步多保真度训练策略, 仅利用短时域输入即可高精度预测长时域响应并推断共振频率。将这种方法应用于超表面设计流程中, 可大幅压缩数据采集时间, 有效

提升逆向设计的整体效率, 从而实现复杂超表面器件的高效优化。

近年来, AI 技术已开始直接用于太赫兹超表面的逆向设计与性能预测, 并逐步从“辅助优化”走向“目标驱动设计”。Ding 等^[44]针对双层石墨烯太赫兹超表面吸收器, 构建了基于人工智能神经网络的逆向设计方法, 设计流程如图 12^[44]所示, 实现了对结构参数的快速反演与吸收窗口的灵活调控。该工作已验证的可调吸收带宽达到 6.70 THz, 设计误差仅约 0.59%, 说明人工智能方法已能够在较宽频带目标下实现较高精度的太赫兹器件设计。此外, Zhao 等^[45]将深度学习方法引入太赫兹生物传感超表面的结构设计, 采用 3 个神经网络, 以光谱响应为中间桥梁, 实现了从目标频率

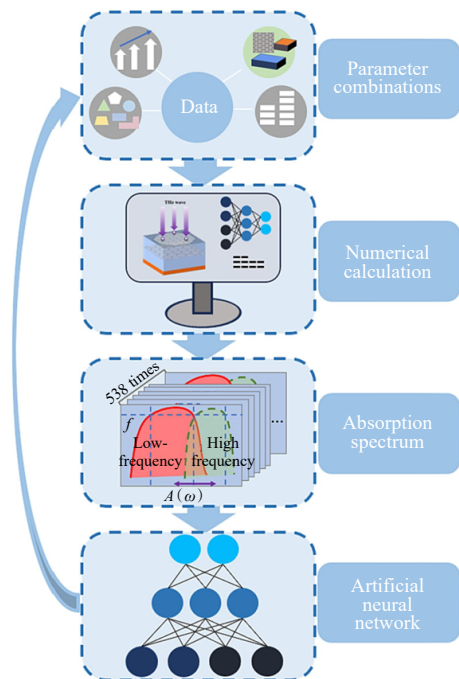


图 12 双层石墨烯超表面吸收体神经网络逆设计流程

和带宽到几何参数的映射,并通过电磁仿真验证了预测结果的一致性。与传统依赖大量电磁仿真和经验调参的方法相比,该研究表明 AI 已能够面向具体应用需求,对太赫兹传感器结构进行定制化快速设计。

AI 技术同样应用于更复杂的太赫兹超表面结构。Gao 等^[46]提出了一维卷积神经网络的太赫兹超表面传感器逆向建模方法,直接以散射参数幅值数据作为输入、以表面结构矩阵作为输出,避免了复杂的数据预处理和额外优化步骤,实现了快速、高效的结构反演。进一步地,Xia 等^[47]面向自由形状和混合功能太赫兹超表面,提出了基于深度 Unet++ 条件生成对抗网络(deep Unet++ conditional generative adversarial network, Deep UCGAN++)的智能设计框架,并建立了包含 20000 个样本的自由图案的混合模式数据集,用于实现完美吸收与线极化转换等复合功能目标的正向预测与逆向生成。研究在测试集中选取 54 个样本,对预测峰值吸收进行对比,显示出该方法在复杂功能目标下仍具有较好的准确性和泛化能力。总体来看,AI 在太赫兹超表面设计中的应用,正由规则参数结构优化逐步拓展到自由形貌、多功能和高维目标的联合设计。

2.2 自适应控制超表面

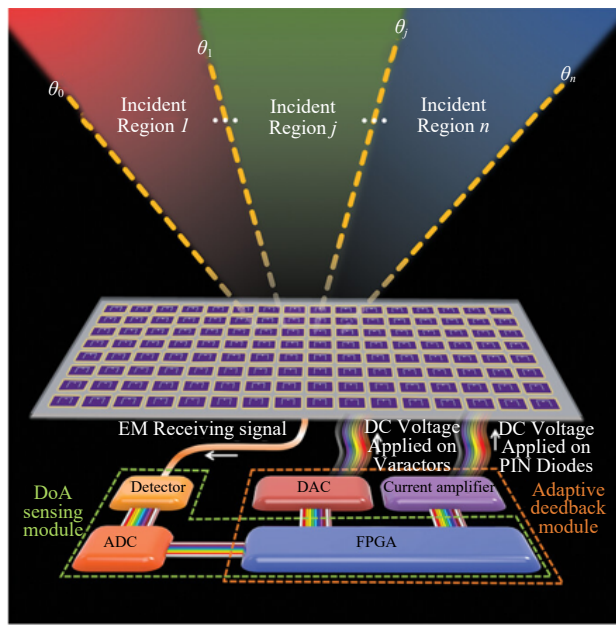
自适应控制超表面通过引入传感器、控制电路与

智能算法,使超表面能够实时获取环境信息,并根据目标状态或外界输入自主调整电磁响应,从而构建起“感知—决策—控制”的闭环执行链条。现有研究表明,在微波频段,智能超表面已在动态隐身、入射方向感知、自适应波束跟踪以及语音和视觉驱动的人机交互等方面形成较清晰的系统实现路径。相比之下,太赫兹频段受限于前端探测器件、反馈链路、阵列级驱动和系统集成能力,目前更突出的进展主要体现在环境感知闭环的初步验证、可编程感知前端构建以及成像与智能分析链条的逐步建立。

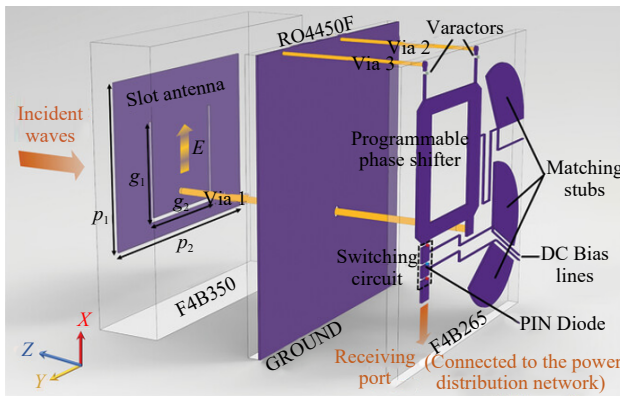
2.2.1 环境交互

集成智能化系统的超表面能够感知环境变化,例如温度、运动速度、来波角度等,并且能够在没有人工干预的情况下自动调整状态,实现相应的功能。Zhang 等^[48]提出并实验验证了一种“智能多普勒斗篷”,将可编程超表面与实时传感—反馈控制系统深度集成,实现了从“空间静态隐身”到“智能时域动态隐身”的跨越。其核心是利用时间调制结构主动抵消目标运动引起的多普勒频移,并借助速度传感器、微控制器和任意波形发生器构成闭环控制回路,从而实现无须人工干预的动态调节。Liu 等^[49]提出一种将感知与控制集成于同一孔径的新方法,由此设计了一种智能共孔径复用超表面。超表面阵列和单元结构如图 13^[49]所示,超表面背面集成了用于识别和反馈控制的自制智能模块,它可以实现空间波接收以感知入射波的角度信息,并自适应地操纵后向散射波。超表面内有十几种接收阵型,通过内置的压缩感知算法可以快速判断入射电磁波方向,将该方向与事先预设好的功能区域匹配,从而做出决策并切换到逆反射或者低散射的功能。以上工作表明如今在微波频段,环境交互型智能超表面已经形成较为清晰的“感知—决策—执行”实现框架。

在太赫兹领域,环境感知闭环调控相关研究整体仍处于起步阶段,但已出现具有代表性的系统级验证工作。Chen 等^[50]设计的太赫兹智能超表面如图 14^[50]所示,该超表面单元由金属—绝缘层—金属 3 层结构构成,以 VO_2 微桥作为像素。通过电偏压控制 VO_2 在金属态和绝缘态之间切换,可实现相位调制;而在中间态时,单元又可利用 VO_2 的热吸收特性实现太赫兹波功率探测。该超表面太赫兹智能超表面由 1×48 个



(a) 智能超表面原理

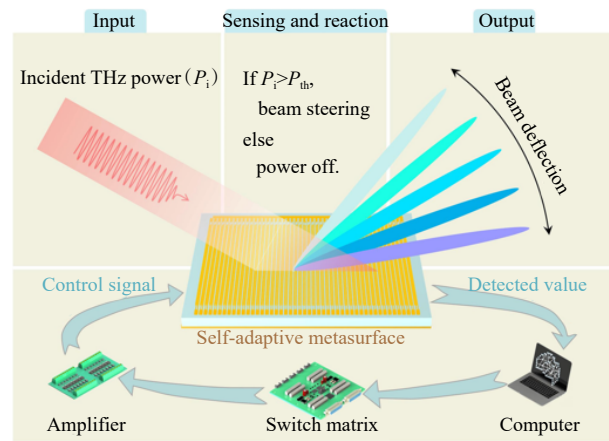
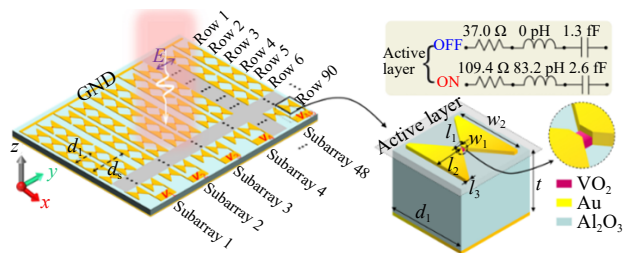


(b) 超表面单元的分解图

图 13 智能共孔径复用超表面

子阵列组成,每个子阵列同时具备太赫兹反射调制与微测辐射热计探测能力。通过施加不同编码序列,该系统可实现最高 42.8° 的太赫兹波束偏转,并在同一平台内完成探测、决策与调控的一体化验证。具体而言,将部分子阵列指定为传感阵列,用于探测入射波功率,并将信号传递给主机中的预设算法模块。随后,系统根据预定义逻辑做出决策,并通过可编程开关矩阵和多通道功率放大器实时改变施加在各子阵列上的电压,从而实现对外界环境输入的自适应响应。整个过程在预设决策逻辑下自动完成,体现出较完整的闭环调控特征。

总体来看,环境交互型智能超表面的关键在于实现环境信息获取、状态判别与阵列执行之间的有效闭环。在微波频段,该路线已形成较成熟的系统实现框

(a) 基于 VO_2 的智能自适应超表面系统的整体框架

(b) 自适应超表面结构示意图,单元结构与等效电路模型

图 14 太赫兹智能超表面

架;而在太赫兹频段,现有研究更多集中于探测与调控功能的一体化集成,系统级环境交互能力仍有待进一步发展。后续研究的重点在于提升高频探测器件、控制链路和阵列级集成能力,从而推动太赫兹环境交互由单点功能验证走向稳定的系统实现。

2.2.2 多模态交互

多模态交互是一种融合文字、语音、动作等多种感官通道的人机交互方式,通过集成传感器和智能单元或者模块,超表面可以自动调整其电磁特性。Li 等^[51]提出了一套基于计算机视觉与双极化数字可编程超表面的智能跟踪系统。该系统以 Intel RealSense 相机作为感知前端,采集环境信息;采用 YOLOv4-tiny 模型实时检测运动目标;最终,通过一个预训练的神经网络,将目标角度映射为最优的超表面编码序列,完成动态波束控制的决策与执行。实验表明,该系统能实时跟踪移动模型车,并实现针对目标的定向波束成形与无线通信。类似地,Li 等^[52]提出了一种基于视觉交互的可重构智能超表面系统,用于无线能量传输。系统工作时,立体相机实时获取环境中目标的位置与数量信息,智能计算单元基于 YOLOv5 算法完成目标检测与定位,并生成相应的超表面相位控制图案,从

而实现对静止或移动目标的定向波束成形,系统架构如图 15^[52]所示。实验表明,该系统可对手机、充电宝等日常电子设备进行选择性无线供电,并同步支持无线信息传输。

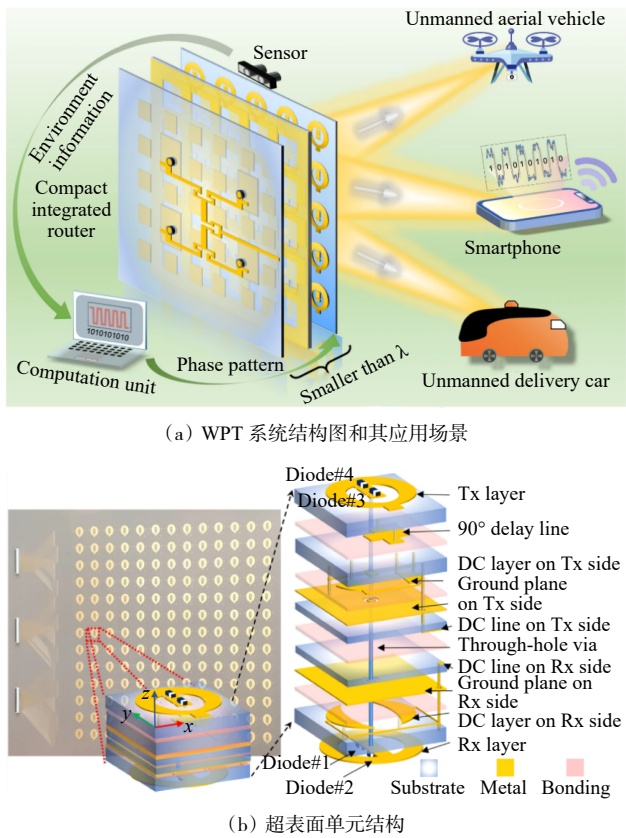


图 15 视觉交互智能超表面

语音交互为智能超表面提供了自然、直观的控制方式,进一步拓展了其在人机交互场景中的应用潜力。Meng 等^[53]提出了一种面向智能会议室场景的语音交互信息超表面系统。该系统基于 12×12 单元的可编程超表面,集成语音识别、语音合成、传感器标签网络与核心处理单元,支持“指令模式”和“自主模式”2 种工作方式。在指令模式下,用户可通过语音命令指定视频传输的座位;在自主模式下,系统根据传感器数据自动向被使用的座位发送视频信息,同时支持对充电板上的设备进行无线供电。Dong 等^[54]则提出了用于实时无线能量传输与通信的语音交互智能超表面系统。图 16^[54]展示了该系统由深度相机、语音识别模块、边缘 AI 计算模块、FPGA 和可编程超表面组成。系统运行时,深度相机和语音模块分别采集环境信息与用户指令,边缘 AI 融合 2 类信息,通过近场聚焦算法生成相位控制信号,经 FPGA 控制超表面单

元状态,形成定向波束,最终实现对静止或移动目标的定向无线充电与视频传输。

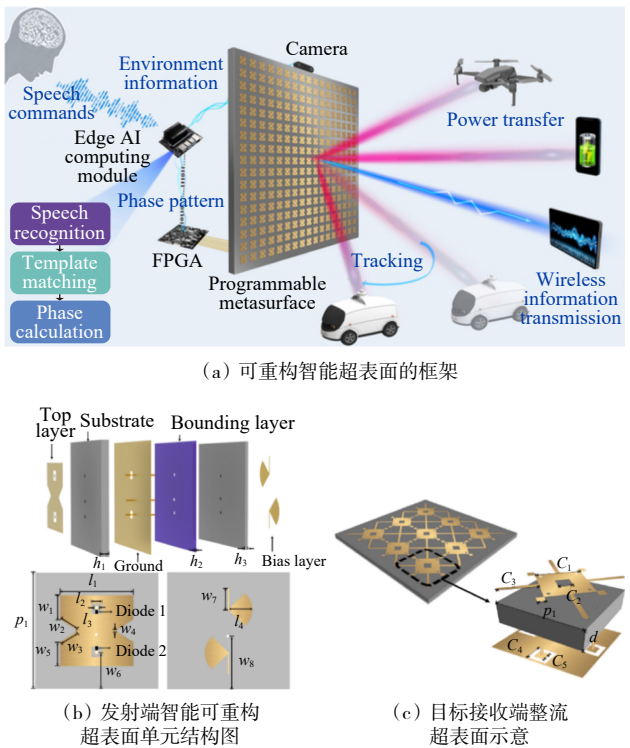


图 16 语音控制的智能超表面

太赫兹频段尚未形成与微波频段对应的成熟多模态交互平台,其当前进展更多体现在可编程感知前端和成像平台的逐步建立。Li 等^[55]设计了基于液晶超表面吸收器的 8×8 太赫兹空间光调制器,如图 17^[55]所示,用于单像素压缩成像,并实现了双频成像。研究者提出的自动校准压缩感知算法可减弱空间不均匀入射波和像素调制误差的影响,同时通过双频互补调制实现负值 Hadamard 掩模,使成像时间缩短了一半。该工作的重要意义不仅在于成像本身,更在于为

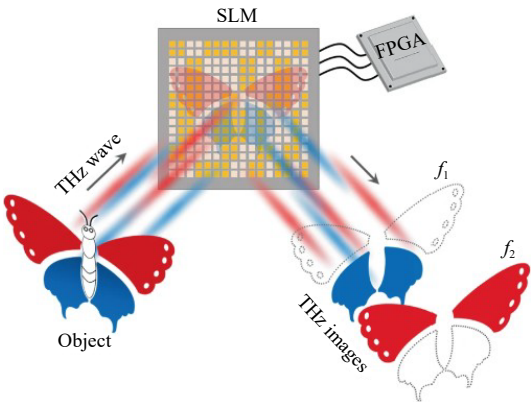


图 17 太赫兹空间光调制器示意

太赫兹波段提供了像素级可编程调制与可重构感知界面。此外, Liu 等^[23]基于单像素可重构石墨烯超表面实现了超宽带太赫兹指纹增强感知与反演识别, 将可重构前端与反演模型结合起来, 体现了太赫兹感知前端与智能算法耦合的发展方向。

在智能分析环节, Roh 等^[56]将超表面增强太赫兹成像与神经网络判别相结合, 用于胶质母细胞瘤小鼠脑组织的无标记成像与边界识别。该工作利用纳米缝超表面增强太赫兹图像对比度, 并通过神经网络实现肿瘤组织边界判别, 肿瘤区识别准确率超过 99%, 表明“太赫兹超表面感知前端—图像增强—智能判别”这一链条已经具备初步可行性。总体来看, 太赫兹频段当前更突出感知前端、成像平台和智能分析链条的建设。这些工作尚不等同于成熟的多模态交互系统, 但已为后续面向太赫兹频段的交互式智能超表面发展提供了重要基础。

2.3 智能超表面应用

2.3.1 太赫兹成像

太赫兹成像具有非电离、宽谱信息丰富及对材料内部结构敏感等特点, 在无损检测、安全检查和复杂目标识别等领域具有重要应用潜力。与传统太赫兹成像系统相比, 超表面能够通过局域场增强、频率复用和空间调制等方式提升信息获取能力, 从而推动太赫兹成像向可编程、高通量和智能化方向发展。Wang 等^[57]提出了一种基于高 Q 值连续谱束缚态(bound state in the continuum, BIC)的多频太赫兹可编程超表面数字成像方法。该系统由铝-石墨烯可编程超表面和 FPGA 控制模块组成, 可通过独立调节不同子阵列的透射特性实现多通道数字成像。该工作说明, 频率复用与可编程超表面结合, 为太赫兹成像系统提供了新的信息调制与获取方式。

超表面还可与衍射计算和单像素探测结构结合, 进一步拓展太赫兹成像的应用边界。Li 等^[58]提出了一种单像素衍射太赫兹处理器, 利用深度学习优化的衍射层直接对样品内部隐藏目标或缺陷进行快速检测。该方法无须逐点扫描, 也不需要显式形成和处理二维图像, 而是通过输出光谱直接判别样品内部是否存在隐藏结构, 从而显著降低了数据采集与后处理负担。太赫兹超表面与计算成像方法结合后, 可由传统“成像—重建—识别”的流程进一步发展为“调制—感

知—判别”一体化的信息获取模式。

进一步地, Liao 等^[59]提出了基于全光混合超表面的超快太赫兹计算光谱与单像素成像平台, 如图 18^[59]所示。该平台利用支持多个准连续谱束缚态(quasi-bound states in the continuum, q-BIC)的混合超表面, 构建了宽带、低相关性且超快的空间光调制器, 并将其应用于太赫兹计算光谱和单像素成像。与依赖机械延迟线和相干探测的传统方案相比, 该工作展示了太赫兹成像系统向全光调制、高通量获取和超快重建方向发展的潜力。太赫兹超表面成像正在由单一的波前调控器件逐步演进而为集成空间调制、信息编码和智能识别能力的复合型成像平台。

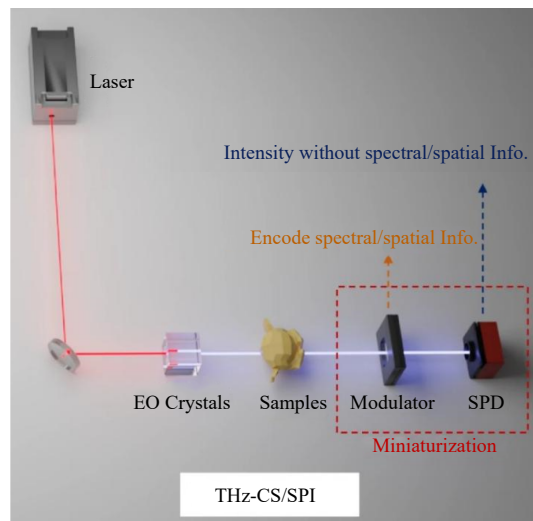


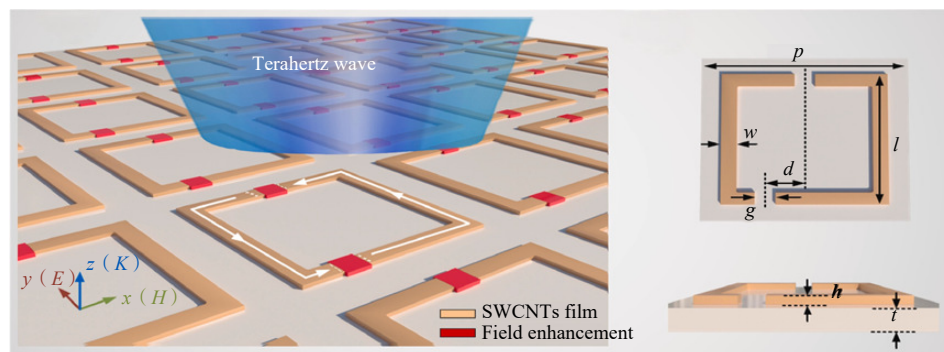
图 18 基于混合超表面的计算光谱与单像素成像系统

2.3.2 生物医学

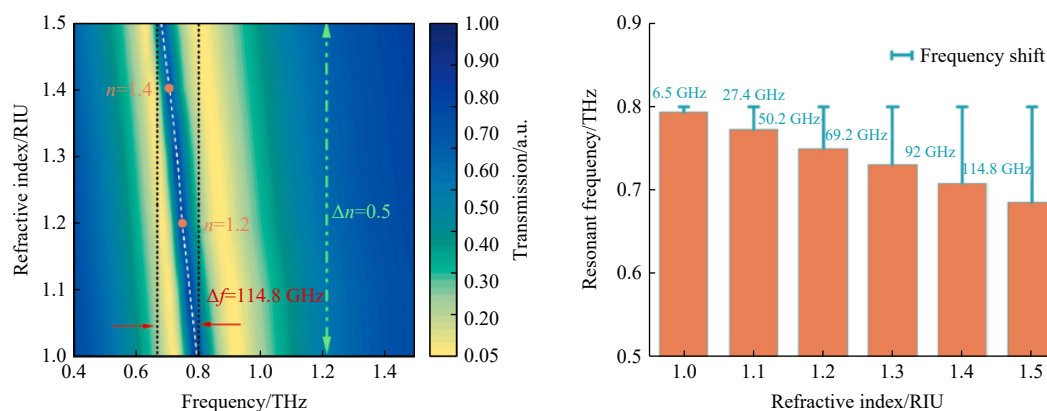
太赫兹波具备指纹谱特性、低光子能量与非电离性等优势, 适用于生物分子检测。结合超表面增强波与物质相互作用的能力, 太赫兹超表面技术在生物医学检测与识别中展现出良好前景。Roh 等^[56]已验证了超表面增强太赫兹成像与智能识别相结合在胶质母细胞瘤边界识别中的应用潜力, 说明太赫兹智能超表面有望为无标记生物组织识别提供新的技术手段。Zhang 等^[60]开发了一种基于单壁碳纳米管薄膜的太赫兹超表面传感器, 结构如图 19(a)^[51]所示。该器件通过酸处理优化薄膜特性, 并采用非对称谐振器设计激发 Fano 共振以增强局域场效应。传感性能如图 19(b)^[51]所示: 左图为模拟透射谱, 显示谐振频率随分析物折射率增加而发生红移(白色虚线标示); 右图显示实测共振频移与折射率变化呈线性关系, 灵敏度达

229.6 GHz/RIU。为进一步提升选择性,研究团队对金纳米颗粒进行化学修饰,最终实现了对血清淀粉样

蛋白 A(serum amyloid A, SAA)的飞摩尔级高灵敏度与高特异性检测。



(a) 超表面结构示意图



(b) 折射率传感性能分析

图 19 太赫兹超表面传感器

针对现有无创呼吸监测在人体运动状态下易受干扰的问题, Li 等^[61]提出了名为 BioMeta 的模块化可编程超表面系统。系统通过机械旋转式可编程超表面单元实现对电磁波相位的连续控制,能够在三维空间中波束动态聚焦到人体胸部,从物理层面抑制肢体运动与环境所产生的噪声。研究显示, BioMeta 具备不需要持续供电与低功耗特性,并且其模块化与可拆卸设计也显著提升了部署灵活性。实验结果表明,该系统在人体处于摆臂、行走等运动状态下,仍能实现对呼吸频率的高准确度估计,平均误差仅约 0.5 次/min,并在多人监测场景中通过时分复用展现了良好的鲁棒性。该工作为推动无创、长时间、可扩展的生命体征监测提供了兼具高性能、低能耗与环保潜力的创新硬件方案,尤其适用于智能家居与健康监护等实际应用场景。

2.3.3 6G 通信

在 6G 通信场景中,太赫兹超表面具有高方向性

波束控制、低剖面集成和动态重构等优势,可在链路增强、波束赋形、全空间覆盖和通信感知一体化等方面发挥重要作用。Shen 等^[62]提出的用于 5G-A/6G 通信的网络亚太赫兹透射式可重构智能表面,通过 PB 相位超表面与肖特基二极管自开关键控(on-off keying, OOK)调制相结合,在实验中实现了 2.8 dB 的最小插入损耗、12 dB 的 OOK 调制深度和 $\pm 60^\circ$ 的波束扫描范围,并构建了集成高速波束扫描与自 OOK 调制的平台,验证了不同方向的点对点信号传输能力。Venkatesh 等^[40]提出了基于平铺 CMOS 芯片的高速可扩展太赫兹全息可编程超表面,如图 20 所示。该平台由 576 个可独立寻址的单元构成,每个单元均支持 8 bit 数字控制,工作速度达到 GHz 量级。研究表明,该器件在约 0.3 THz 频段可实现约 25 dB 的幅度调制深度、 $\pm 30^\circ$ 的动态波束形成、多波束生成,以及可编程波前控制。该工作说明,基于半导体工艺的大规模可编程太赫兹阵面已具备较好的可扩展性与高速控

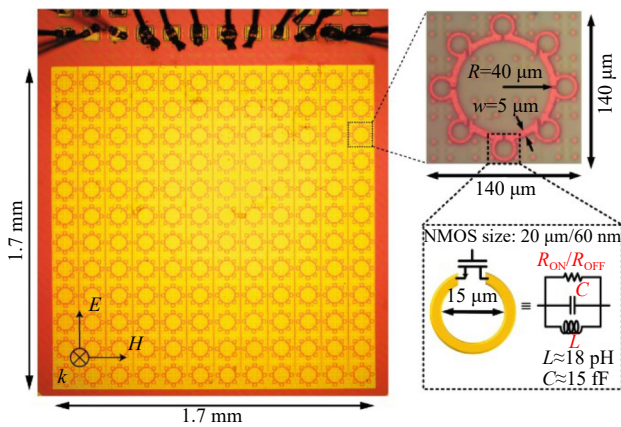


图 20 高速可扩展太赫兹全息可编程超表面

制能力,可为未来高容量、高集成度的高频无线通信平台提供重要硬件基础。

将可重构智能超表面与低地球轨道(LEO)卫星技术结合是 6G 的一个重要方案^[63-64]。该方案系统性地结合了 LEO 卫星的广域三维覆盖能力与 RIS 的灵活、低功耗波束重构特性,形成一种兼具覆盖广度和控制智能的新型网络架构。首先,在卫星信号受遮挡或仰角不足的区域, RIS 可通过建立级联链路扩展网络覆盖,解决传统卫星通信的盲区问题。然后,针对卫星高速运动引起的多普勒频移, RIS 能通过实时相位调节进行动态补偿,保障链路稳定性。进一步地,在密集波束场景下, RIS 可执行智能波束赋形,在增强目标信号的同时抑制同频干扰,提升频谱利用率。此外, RIS 还兼具环境感知能力,实现通信与探测功能的

同步执行,为空地网络的智能协同与自主决策提供支持。该技术框架具有向太赫兹等高频段演进的潜力,进一步结合全息多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)表面后,有望在系统容量、抗干扰能力和覆盖灵活性等方面获得更大提升,为构建 AI 驱动的 6G 空地一体化网络奠定关键技术基础。

2.3.4 军事领域

隐身技术通过降低目标的可探测性,使其难以被侦测、识别与跟踪,在军事领域具有广泛应用。Zhao 等^[65]提出了一种能够自适应调节的透明隐身隧道,实现电磁隐蔽。图 21^[65]展示了元强化学习(meta-reinforcement learning, MRL)隐身算法的整体架构,该架构是一个融合感知、决策与控制的智能闭环系统。具体而言,该架构设计了一个超网络,整合当前任务特征(如目标属性和波束方向)与系统的实时交互数据,通过整合计算,输出一套为当前任务量身定制的控制策略参数。然后,策略网络在这套定制策略的引导下,根据探测器实时获取的环境电磁场数据,计算出每个超表面单元所需的精确控制电压。接下来,环境反馈环将电压指令施加于超表面,使其散射特性发生改变;系统随即评估隐身效果并生成性能反馈信号,从而驱动整个控制策略进行在线、持续的动态优化。文中的超表面隐身隧道虽受限于变容二极管特性而工作在微波频段,但其算法框架本身可适用于太赫兹及光学领域。

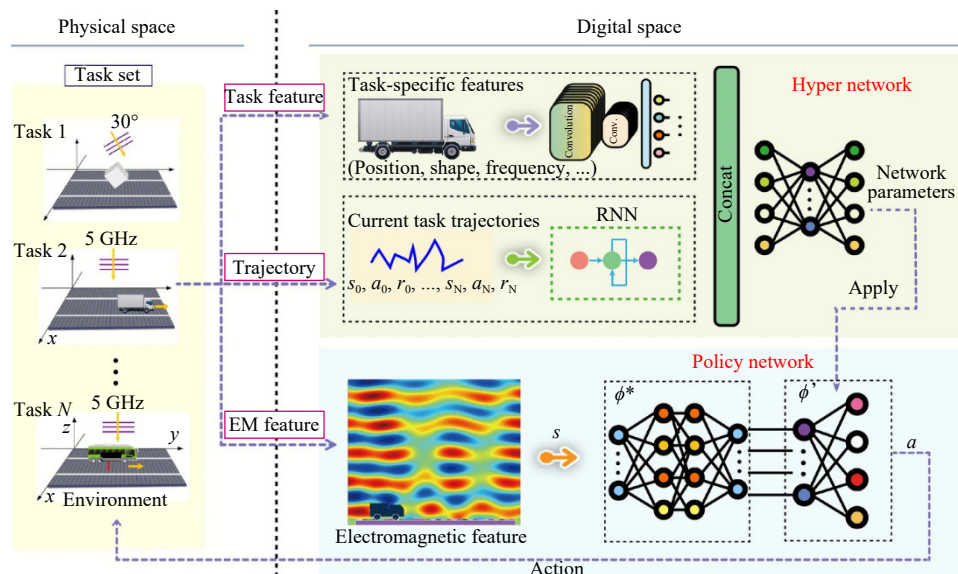


图 21 元强化学习隐身隧道的架构

太赫兹波具有高精度成像与远距离通信抗干扰能力强的特点,在电磁作战中具有很大优势,而在智能电磁平台设计中,通信与感知等功能正呈现深度融合的趋势。Ebrahimi 等^[66]提出了一种太赫兹通信感知一体化系统,引入同时透射反射可重构智能表面,动态地将入射电磁波能量一部分向前方空间透射、另一部分向后方空间反射,从而将三维空间物理分割为 2 个可独立控制的功能区域(感知区与通信区)。在此基础上,结合堆叠智能超表面所提供的高精度、低复杂度的波束赋形能力,该架构在单一硬件平台上实现了感知与通信功能的深度协同。该研究通过将元强化学习与生成对抗网络相结合,来提升系统在复杂不确定电磁环境中的鲁棒性与自适应能力,能够在保证多目标感知精度的同时,动态实现波束赋形与资源分配。研究展示了可重构超表面与智能算法协同,在复杂动态环境中实现多任务并行优化与自主控制的能力。该研究预示着未来的智能表面系统能够进一步融合通信、感知乃至电磁对抗等多种功能,向多功能、自适应、深度协同的一体化平台演进。

随着太赫兹智能超表面研究由单元级功能验证逐步走向系统实现,系统集成能力与原型平台验证的重要性不断提升。现有研究已开始从小规模阵列的电磁响应调控拓展到通信链路验证和大规模可编程阵面集成。例如, Wang 等^[34]已在 0.14 THz 频段实现反射/透射模式切换、实时波束跟踪和视频传输; Venkatesh 等^[40]基于 65 nm CMOS 工艺构建了包含 576 个可独立寻址单元、支持 8 bit 数字控制和 GHz 量级工作速度的太赫兹全息可编程超表面; Shen 等^[62]则在亚太赫兹频段实现了波束扫描与自开关键控调制一体化验证,体现了太赫兹智能超表面由功能演示走向通信导向原型系统的发展趋势。

太赫兹智能超表面目前仍以实验室原型验证为主,尚缺乏面向长期稳定运行、低成本封装和统一接口的产品级实现。此外,专门面向太赫兹智能超表面的统一标准体系尚未建立,但相关工作已开始依附于太赫兹通信与 6G 标准化进程推进。例如, IEEE 802.15.3d-2017 已定义 252~325 GHz 点对点无线链路规范,支持最高 100 Gb/s 传输速率; 3GPP 已于 2024 年 12 月批准 6G 场景与性能需求研究项目; ITU-R WP 5D 也已于 2026 年 2 月完成 IMT-2030 技

术性能要求草案。这些工作为太赫兹智能超表面的未来工程应用提供了外部标准背景。总体而言,太赫兹智能超表面的进一步发展仍需要在大规模制造、封装互连、系统可靠性和测试评价方法等方面持续完善。

3 结论与展望

太赫兹超表面作为新型二维人工电磁材料,在智能波前控制领域展现出较大的技术潜力。其发展经历了从静态控制、动态可重构,到融合 AI 技术实现“感知—决策—控制”的演进。目前,动态控制已形成多技术路径:机械重构适用于大角度波束扫描,光电调谐材料具备快速响应优势,相变材料可实现开关式折射率跳变,集成半导体元件的可编程超表面易于片上集成。这些技术的成熟,为太赫兹通信、成像与传感提供了灵活、低功耗的波前控制能力。AI 更进一步应用于设计与控制全流程,深度学习加速了逆向设计效率,而集成传感器与智能算法则赋予超表面系统环境感知与自主决策的能力,推动超表面向认知系统演进。

太赫兹智能超表面正处于由原理验证走向系统实现的关键阶段,但其进一步发展仍面临挑战。首先,太赫兹频段中导体损耗、介质吸收及器件附加损耗更为敏感,容易导致阵列级实现中出现效率下降和带宽受限等问题。其次,太赫兹感知与反馈链路的系统化实现仍不充分,现有前端硬件、信号质量和实时处理能力仍对闭环控制性能形成约束。随着器件向大规模阵列和系统级平台发展,系统集成和封装工艺问题日益突出。最后,太赫兹器件对微纳加工精度和材料均匀性高度敏感,制造误差和样品间离散性会进一步加剧理论设计与实际性能之间的偏差。

太赫兹智能超表面的未来研究可进一步围绕低损耗可调材料、高灵敏感知前端、封装协同设计及系统级测试评价方法展开。一方面,需要发展兼具较大调控幅度、较低损耗与较快响应的新型材料和器件结构;另一方面,应加强太赫兹传感、通信与控制电路的集成,推动智能超表面由“功能验证”向“稳定系统实现”转变。同时,还需要面向 6G 通信、高分辨率成像和生物学检测等具体场景,逐步完善更统一的性能指标与实验验证体系,从而增强该领域研究的工程指导意义。

参考文献(References)

- [1] Wang W H, Tan Y J, Tan T C, et al. On-chip topological beamformer for multi-link terahertz 6G to XG wireless[J]. *Nature*, 2024, 632(8025): 522–527.
- [2] Chen H, Sarieddeen H, Ballal T, et al. A tutorial on terahertz-band localization for 6G communication systems[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(3): 1780–1815.
- [3] Tan X X, Zhong Y, Li R J, et al. Neuromodulation of chemical synaptic transmission driven by THz photons[J]. *Research*, 2022, 2022: 10.
- [4] Mohammadzadeh S, Keil A, Kocybik M, et al. Extreme ultra-wideband optoelectronic frequency-modulated continuous-wave terahertz radar[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(11): 2300396.
- [5] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2535.
- [6] Alonso-delPino M, Jung-Kubiak C, Reck T, et al. Beam scanning of silicon lens antennas using integrated piezomotors at submillimeter wavelengths[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(1): 47–54.
- [7] Tousi Y, Afshari E. A high-power and scalable 2-D phased array for terahertz CMOS integrated systems[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2015, 50(2): 597–609.
- [8] Fu X J, Yang F, Liu C X, et al. Terahertz beam steering technologies: From phased arrays to field-programmable metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(3): 1900628.
- [9] 司黎明, 邓嘉轩, 吕昕. 机器学习辅助太赫兹涡旋波超表面快速设计方法[J]. *无线电通信技术*, 2024, 50(1): 128–134.
- [10] 张航, 董琳, 汤鹏程, 等. 双频太赫兹圆极化吸波与异常反射手性超表面[J]. *电子学报*, 2023, 51(10): 2690–2699.
- [11] 司黎明, 董芳会, 董琳, 等. 2022年太赫兹人工表面等离激元科技热点回眸[J]. *科技导报*, 2023, 41(1): 173–183.
- [12] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333–337.
- [13] 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.
- [14] Amin M, Siddiqui O, Abutarboush H, et al. A THz graphene metasurface for polarization selective virus sensing[J]. *Carbon*, 2021, 176: 580–591.
- [15] Li J T, Li J, Zheng C L, et al. Dynamic control of reflective chiral terahertz metasurface with a new application developing in full grayscale near field imaging[J]. *Carbon*, 2021, 172: 189–199.
- [16] Yang R S, Fan Y C, Zhu W, et al. Terahertz silicon metagratings: High-efficiency dispersive beam manipulation above diffraction cone[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(7): 2200975.
- [17] Nie R X, He C H, Zhang R X, et al. Vanadium dioxide-based terahertz metasurfaces for manipulating wavefronts with switchable polarization[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 109010.
- [18] Wang Z Z, Ji J T, Ye X, et al. On-chip integration of metasurface-doublet for optical phased array with enhanced beam steering[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(13): 2425–2432.
- [19] Jiang S B, Zheng P, Zang G X, et al. Cascaded metasurfaces enabled versatile beam steering from propagating waves to surface waves[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2026, 20(2): e00393.
- [20] Cai X D, Tang R, Zhou H Y, et al. Dynamically controlling terahertz wavefronts with cascaded metasurfaces[J]. *Advanced Photonics*, 2021, 3(3): 036003.
- [21] Cheng J R, Yang Y, et al. Continuous terahertz omnidirectional beam steering by dual diffraction of metagratings[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(1): 44.
- [22] Sun Z C, Liang C, Chen C, et al. High-efficiency dynamic terahertz deflector utilizing a mechanically tunable metasurface[J]. *Research*, 2023, 6: 274.
- [23] Liu B W, Peng Y, Hao Y F, et al. Ultra-wideband terahertz fingerprint enhancement sensing and inversion model supported by single-pixel reconfigurable graphene metasurface[J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 10.
- [24] Sun Z S, Huang F M, Fu Y Q. Graphene-based active metasurface with more than 330° phase tunability operating at mid-infrared spectrum[J]. *Carbon*, 2021, 173: 512–520.
- [25] Deng G S, Zhu Y X, Zhang Q, et al. Reconfigurable dual-functional reflective polarization converter based on liquid crystal terahertz metasurfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2025, 73(6): 4164–4169.
- [26] Vasić B, Isić G, Beccherelli R, et al. Tunable beam steering at terahertz frequencies using reconfigurable metasurfaces coupled with liquid crystals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(5): 7701609.
- [27] Shen Z, Li W L, Jin B B, et al. A liquid crystal-based multi-bit terahertz reconfigurable intelligent surface[J]. *APL Photonics*, 2024, 9: 016109.
- [28] Iyer P P, Butakov N A, Schuller J A. Reconfigurable semiconductor phased-array metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(8): 1077–1084.
- [29] Tan Z Y, Fan F, Guan S N, et al. Terahertz nonreciprocal beam deflection and isolating based on magneto-optical anisotropic metadvice[J]. *Advanced Optical Materials*, 2023, 11(9): 2202938.
- [30] Zhang R, Li X C, Liu Q H. Switchable and multifunctional terahertz photonic devices based on VO₂-assisted phase encoded metasurfaces[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110568.
- [31] Abdollahramezani S, Hemmatyar O, Taghinejad M, et al.

- Electrically driven reprogrammable phase-change metasurface reaching 80% efficiency[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 1696.
- [32] Yu R, Liu D, Cai X H, et al. A GaN Schottky barrier diode-based terahertz metasurface for high-precision phase control and high-speed beam scanning[J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(39): 2507534.
- [33] Lan F, Wang L Y, Zeng H X, et al. Real-time programmable metasurface for terahertz multifunctional wave front engineering[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 191.
- [34] Wang L Y, Lan F, Liang S X, et al. A dual-programmable metasurface with duplex beam steering for full-space terahertz communications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(20): e00480.
- [35] Guo H B, Chen B W, Li Y, et al. Broadband, transmissive, and cascable terahertz programmable metasurface[J]. *ACS Nano*, 2025, 19(23): 21660–21668.
- [36] Tian H W, Zhang X G, Jiang W X, et al. Programmable controlling of multiple spatial harmonics via a nonlinearly phased grating metasurface[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(31): 2203120.
- [37] Guo G X, Zhang X Q, Niu L, et al. Programmable graphene metasurface for terahertz propagation control based on electromagnetically induced transparency[J]. *Carbon*, 2023, 208: 345–354.
- [38] Selvaraj M, Sreeja B S. Fabrication approaches for THz metasurfaces: A comprehensive review[J]. *Optik*, 2026, 347: 172664.
- [39] Fu X J, Shi L, Yang J, et al. Flexible terahertz beam manipulations based on liquid-crystal-integrated programmable metasurfaces[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(19): 22287–22294.
- [40] Venkatesh S, Lu X Y, Saeidi H, et al. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips[J]. *Nature Electronics*, 2020, 3(12): 785–793.
- [41] Niu R, Si L M, Zhu W R, et al. Hybrid neural network-driven inverse design of metasurface for ultrabroadband RCS reduction[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2026, 74(1): 837–847.
- [42] Khatib O, Ren S M, Malof J, et al. Learning the physics of all-dielectric metamaterials with deep Lorentz neural networks[J]. *Advanced Optical Materials*, 2022, 10(13): 2200097.
- [43] Tang Y H, Fan J C, Li X W, et al. Physics-informed recurrent neural network for time dynamics in optical resonances[J]. *Nature Computational Science*, 2022, 2(3): 169–178.
- [44] Ding Z P, Su W, Luo Y L, et al. Artificial neural network-based inverse design of metasurface absorber with tunable absorption window[J]. *Materials & Design*, 2023, 234: 112331.
- [45] Zhao Q X, Liang Y Y, Lv Y, et al. Design of terahertz metasurface structures for biosensing applications based on deep learning methods[J]. *Results in Physics*, 2024, 61: 107804.
- [46] Gao M Z, Jiang D W, Zhu G Y, et al. Deep learning-enhanced inverse modeling of terahertz metasurface based on a convolutional neural network technique[J]. *Photonics*, 2024, 11(5): 424.
- [47] Xia H K, Chen S L, Wang Y X, et al. Deep-learning-assisted intelligent design of terahertz hybrid-functional metasurfaces with freeform patterns[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 112041.
- [48] Zhang X G, Sun Y L, Yu Q, et al. Smart Doppler cloak operating in broad band and full polarizations[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(17): 2007966.
- [49] Liu Y H, Li X H, Zhang Z T, et al. Incident angle sensing and adaptive control of scattering by intelligent metasurface[J]. *Advanced Science*, 2024, 11(40): 2406841.
- [50] Chen B W, Wang X R, Li W L, et al. Electrically addressable integrated intelligent terahertz metasurface[J]. *Science Advances*, 2022, 8(41): eadd1296.
- [51] Li W H, Ma Q, Liu C, et al. Intelligent metasurface system for automatic tracking of moving targets and wireless communications based on computer vision[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 989.
- [52] Li W Z, Yu Q Y, Qiu J H, et al. Intelligent wireless power transfer via a 2-bit compact reconfigurable transmissive-metasurface-based router[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2807.
- [53] Meng Z K, Shi Y, Wu Q W, et al. Voice interactive information metasurface system for simultaneous wireless information transmission and power transfer[J]. *npj Nanophotonics*, 2024, 1: 12.
- [54] Dong L, Si L M, Liu Y Z, et al. Speech-controlled reconfigurable intelligent metasurface for real-time wireless power transfer and communication[J]. *Research*, 2025, 8: 831.
- [55] Li W L, Hu X M, Wu J B, et al. Dual-color terahertz spatial light modulator for single-pixel imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 191.
- [56] Roh Y, Kim K H, Lee G, et al. Metasurface-enhanced terahertz imaging for glioblastoma in orthotopic xenograft mouse model combined with neural network decision making[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2025, 287: 117715.
- [57] Wang X Y, Wang X M, Yao Z B, et al. Digital imaging through terahertz multifrequency programmable metasurface based on BIC[J]. *Optical Materials*, 2023, 143: 114154.
- [58] Li J X, Li X R, Yardimci N T, et al. Rapid sensing of hidden objects and defects using a single-pixel diffractive terahertz sensor[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6791.
- [59] Liao Z J, Xue Z Q, Fan J X, et al. All-optical hybrid meta-

- surfaces for ultrafast computational spectrometer and single-pixel imaging[J]. *Nature Communications*, 2026, 17: 888.
- [60] Zhang X, Wang Y, Luo F, et al. High performance THz metasurface sensor based on modified-SWCNTs film for femtomolar protein detection[J]. *Carbon*, 2024, 227: 119273.
- [61] Li X Y, Chen L, Qin S L, et al. BioMeta: Modular reprogrammable metasurface for noninvasive human respiration monitoring[J]. *Nanophotonics*, 2025, 14(7): 981–991.
- [62] Shen D F, Lan F, Wang L Y, et al. Sub-terahertz transmissive reconfigurable intelligent surface for integrated beam steering and self-OOK-modulation[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14: 13.
- [63] Yang G, Xu X Y, Liang Y C, et al. Reconfigurable intelligent surface-assisted non-orthogonal multiple access[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(5): 3137–3151.
- [64] Toka M, Lee B, Seong J, et al. RIS-empowered LEO satellite networks for 6G: Promising usage scenarios and future directions[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(11): 128–135.
- [65] Zhao J W, Zhu P X, Wen Z B, et al. Adaptive transparent cloaking tunnel enabled by Meta-Reinforcement-Learning Metasurfaces[J]. *Photonix*, 2026, 7(1): 2.
- [66] Ebrahimi K, Mehrzad Z, Javadi S, et al. Stacked intelligent metasurfaces and STAR-RIS-enabled terahertz ISAC system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(12): 19819–19824.

Research progress in intelligent metasurface-based terahertz wave control technologies

SI Liming^{1,2,3,4,5}, WANG Jingsheng^{1,2}, NIU Rong^{1,2}, DANG Chenyang^{1,2}, WANG Zhaorui^{1,2}, BAO Xiue^{1,2,3}, LI Yan⁵, SUN Houjun^{1,2,3}, ZHU Weiren⁶

1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-space, Beijing 100081, China
3. Tangshan Research Institute, Beijing Institute of Technology, Tangshan 063000, China
4. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China
5. Faculty of Engineering, Shenzhen MSU-BIT University, Shenzhen 518172, China
6. School of Integrated Circuits, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract Terahertz waves have shown significant application potential in sixth-generation mobile communications, biomedical imaging, and sensing, while metasurfaces provide a new approach for efficient terahertz-wave manipulation. This paper reviews recent progress in intelligent metasurface-based terahertz-wave control technologies. It systematically summarizes the major implementation routes, including mechanical reconfiguration, optoelectronic tuning, phase-change-material switching, integrated semiconductor devices, and programmable control. It also discusses recent advances in the use of artificial intelligence for inverse design, adaptive environmental interaction, multimodal sensing, and intelligent analysis of terahertz metasurfaces. Furthermore, representative applications in terahertz imaging, biomedical detection, 6G communications, defense and security, as well as system integration and prototype validation are reviewed. Existing studies indicate that intelligent terahertz metasurfaces are evolving from single-function devices toward system-level platforms integrating sensing, decision-making, and control. However, several key challenges remain, including sensitivity to device loss, insufficient front-end sensing hardware, complex array-level driving and packaging, stringent fabrication consistency requirements, and the lack of unified testing and evaluation methods. Future research should therefore focus on low-loss tunable materials, high-sensitivity sensing front ends, array-level collaborative integration, system prototype validation, and standardized evaluation methods, so as to promote the transition of intelligent terahertz metasurfaces from proof-of-concept demonstrations to stable engineering applications.

Keywords terahertz; metasurface; artificial intelligence; intelligent control ●



(责任编辑 徐丽娇)