

本刊专稿

# 无线输能超表面技术研究进展

司黎明<sup>1,2,3</sup>, 马天宇<sup>1,2,3</sup>, 党晨阳<sup>1,2,3</sup>, 刘博洋<sup>1,2,3</sup>, 孙厚军<sup>1,2,3</sup>, 吕昕<sup>1,2,3</sup>

**摘要** 随着无线通信与人工智能技术的发展,小型移动设备的数量正在急剧增加,传统有线电力供应模式已不能满足人们对便携性和移动性的需求。射频与微波无线输能技术能够摆脱有线能源的限制,在无线设备中具有巨大的应用潜力。综述了超表面技术的关键热点,介绍了无线输能融合无线通信、无线传感、可重构智能超表面和目标识别与定位等技术的最新进展。超表面具备独特的电磁参量调控能力和二维紧凑可共形等优势,有望在射频与微波无线输能领域起到关键作用。无线输能超表面技术的关键热点主要包括无线电力传输、无线能量收集、同步无线信息与电力传输和可重构无线输能技术等。在无线输能系统中,超表面可以在发射端生成能量波束,在传输路径中增强耦合谐振,还可以在接收端提高交直流转换效率。

**关键词** 无线输能;无线电力传输;无线能量收集;同步无线信息与电力传输;可重构智能超表面

21 世纪以来,无线通信与人工智能技术得到了广泛的发展,进而使得物联网(Internet-of-things, IoT)得到了暴发式增长<sup>[1]</sup>。当前,无线传感器网络 and 智能移动终端等 IoT 设备的运行,无法离开供电线缆或化学电池提供能量。但是,供电线缆、化学电池的使用,为设备使用场景带来了巨大的限制和严重的环境污染<sup>[2]</sup>。无线输能技术可以摆脱线缆或电池的限制,从而实现设备与电源的分离,因此得到了广泛关注和快速发展<sup>[3]</sup>。无线输能技术使 IoT 设备实现了无线便携以及绿色环保,必将成为信息化、智能化时代的重要技术<sup>[4]</sup>。

超表面是一种由亚波长结构组成的二维人工材料,通过改变其单元的几何形状和空间排列,可以灵

活调控电磁波的幅度、相位和极化等基本特性<sup>[5-8]</sup>。自 2010 年提出这一概念以来<sup>[9]</sup>,经过 10 余年发展,超表面的功能和应用场景得到了显著拓展。从早期的完美吸波体<sup>[10]</sup>,到基于可编程技术的超表面<sup>[11]</sup>,再到如今的全空间超表面<sup>[12]</sup>、非局域超表面<sup>[13]</sup>和时空编码超表面<sup>[14-15]</sup>等,显示出超表面相关研究的高度活力。在射频与微波无线输能系统中,相较于传统收发天线,超表面以其小型化和高集成度等优势,吸引了众多研究者的关注<sup>[16]</sup>。无线电力传输超表面用于无线输能系统发射端或传输路径,通过增强耦合谐振<sup>[17]</sup>、调控能量波束<sup>[18]</sup>和改善电磁干扰<sup>[19]</sup>等措施提高能量传输效率。无线能量收集超表面用于无线输能系统接收端,通过捕获射频能量、单元功率整合和交直流转换输出直流能量,为设备持续供电<sup>[20-21]</sup>。

无线输能超表面技术的关键热点,主要包括无线输能融合无线通信、无线传感、可重构智能超表面和目标识别与定位等技术的最新进展,如图 1 所示。无

1. 北京理工大学集成电路与电子学院,北京 100081
2. 毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室,北京 100081
3. 临近空间环境特性及效应全国重点实验室,北京 100081

收稿日期: 2024-12-30; 修回日期: 2025-01-15  
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0604801); 国家自然科学基金项目(62271056, 62571049, 62171186, 62201037); 国家市场监督管理总局技术创新中心红外遥感定标与计量技术专项(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(KN20250214); 航天九院国防科技重点实验室开放基金项目(6142221200201); 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,电子邮箱: lms@bit.edu.cn  
引用格式: 司黎明, 马天宇, 党晨阳, 等. 无线输能超表面技术研究进展[J]. 科技导报, 2025, 43(18): 23-40; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.01.00009

线输能超表面技术的主要目标在于减少能量损耗,提高传输效率。低功率密度环境下射频能量采集器的研究工作在 2024 年取得较大进展<sup>[22-24]</sup>,有望使射频能源像太阳能、风能等可再生能源一样成为绿色能量来源。无线电力传输与无线信息传输融合形成的同步无线信息与电力传输技术打破了能源与信息之间的壁垒,将特斯拉对无线输电和马可尼对无线电通讯的愿景融合为一种新的、统一的网络范式,开启了真正无线的 IoT 系统的可能性<sup>[25]</sup>。可重构智能超表面的加入,使无线输能系统具备了目标定位和波束定向的能力,极大提升了无线输能技术的灵活性,针对动态移动设备的无线充电成为现实<sup>[26]</sup>。

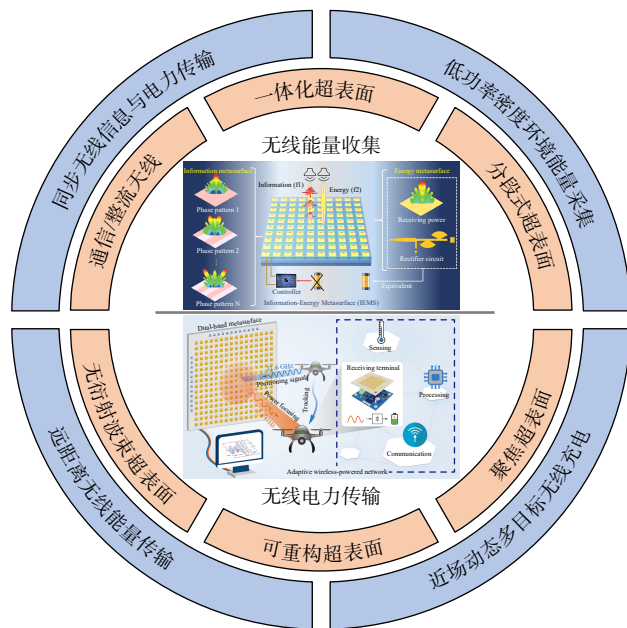


图1 无线输能超表面技术

## 1 无线电力传输超表面

与有线供电技术相比,无线电力传输可以使设备摆脱线缆的限制,降低布置要求与维护成本。与电感、电容功率传输技术相比,无线电力传输具有长距离功率传输的优势,且不易受到天气条件的影响<sup>[27]</sup>。然而,由于无线信道的缺陷,如路径损耗、阴影和多径衰落,特别是当能量发射器到接收器的距离较长时,射频无线电力传输通常以较低的能量效率运行<sup>[28]</sup>。因此,如何对抗无线信道以提高无线电力传输效率是一个至关重要但具有挑战性的问题。超表面强大的电

磁波束调控能力为研究人员提供了解决上述问题的思路,例如聚焦能量波束、增强磁谐振耦合和屏蔽电磁干扰等。

### 1.1 聚焦超表面

利用超表面强大的相位与振幅调控能力和波前操作能力,聚焦电磁波束到能量接收端,是提高射频无线电力传输系统能量传输系数的有效手段,同时能够在不降低接收效率的前提下缩小接收端口径,实现系统的小型化。Yu 等<sup>[29]</sup>提出了一种量化相位梯度近场聚焦超表面来提高电力传输系数,超表面单元由 4 层交叉双裂环谐振器组成,随着最外层裂环间隙大小的变化,结构在宽带内具有高透射系数和覆盖 360°的线性相位响应,再利用量化相位梯度分布确定阵列的布阵方式,实现宽带波束聚焦,可将平均无线电力传输效率提高 5 倍。上述工作对近场的电场进行聚焦,却没有解决在远场如何保持焦点的问题,这使得无线输能系统的工作距离受到极大限制。为扩展系统工作距离,Falchi 等<sup>[30]</sup>提供了远距离低频磁场聚焦的思路,将超表面上的电流分布视为由理想回路组成的平面分布,并计算出聚焦磁场到特定位置所需的铜螺旋结构尺寸,在 4 MHz 的主动馈电射频线圈的激励下,超表面能够在其上方 10 cm 的点处聚焦形成直径 40 mm 的磁场束,这项研究对提高无线电力传输工作距离有着指导作用。

除了将能量波束聚焦为斑点以提高接收端同口径下的接收功率外,Xiong 等<sup>[31]</sup>提出了在接收端利用反射相位梯度超表面将入射波转换为表面波,再由专门的表面波能量汇聚阵列进行能量采集的新思路。如图 2 所示,超表面单元是常见的金属开口环谐振器,通过调节开口位置距边界的距离实现相位控制,选择 6 个特定的距离,即可实现 60°的相位梯度区间,从而将任意垂直入射波耦合为表面波输出,该反射相位梯度超表面直接与基于方形贴片的表面波汇聚阵列相连,这样可以有效利用接收器孔径面积,实现表面波能量高效汇聚。实验表明在 5.8 GHz 处,超表面将入射波转换为表面波的效率达到 85.32%,能量收集效率达到 68.26%,此外,当发射端与接收端距离较远时,该超表面仍然具有较高的能量利用效率,为远距离高效无线电力传输提供了一种实用、经济的解决方案。

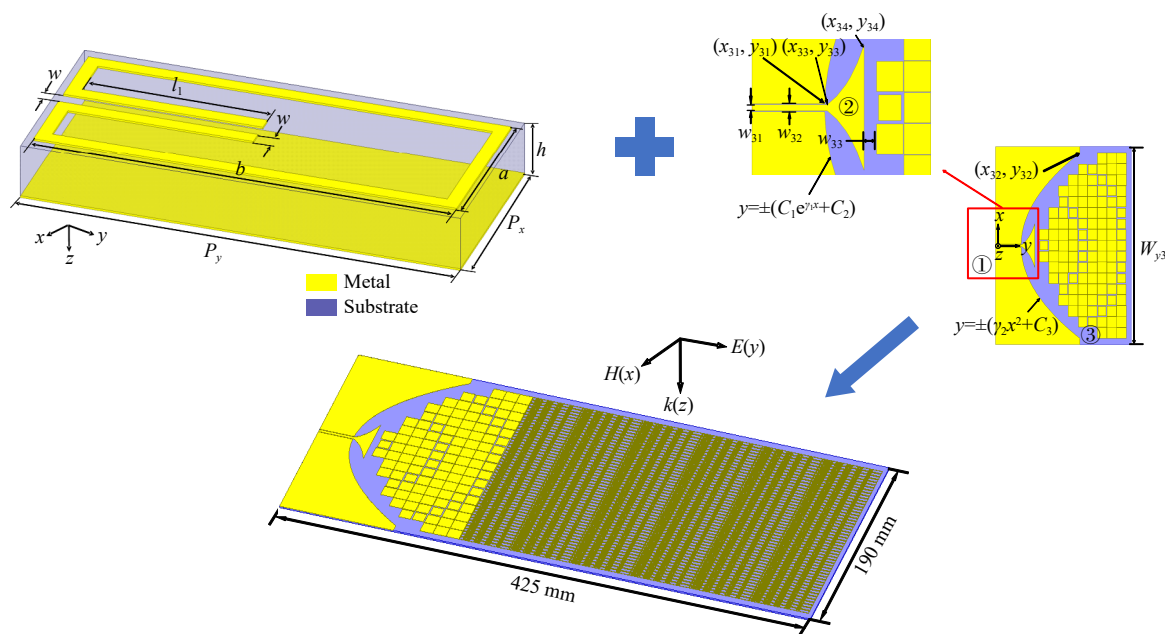


图2 反射相位梯度超表面+表面波能量汇聚阵列

## 1.2 无衍射波束超表面

无衍射波束的强度在一定范围内随着传播距离的增加不会发散,在传播过程中的形状和尺度的变化可以人为控制<sup>[32]</sup>。这种波束具备的较长无衍射距离以及对多种障碍的耐受力,使其成为近年来无线电力传输的研究热点。无衍射波束包括贝塞尔波束、艾里波束、余弦波束等,其中贝塞尔波束是最早发现的无衍射波束,也是无衍射波束的代表。研究无衍射波束的

生成并用于传输能量,是提升无线电力传输系统效率的有效措施之一。

Dong 等<sup>[33]</sup>在反射型光学透明超表面中应用几何光学方法确定相位分布,从而产生了高效的零阶贝塞尔波束,在 1.5 m 的距离处实现了 75.21% 的传输效率,同时具有 360° 相位变化以及低于 1.5 dB 的峰值回波损耗。如图 3 所示,由 ITO 和钠石灰玻璃基板组成的超表面具有高透明度,从而有望集成到太阳能收集

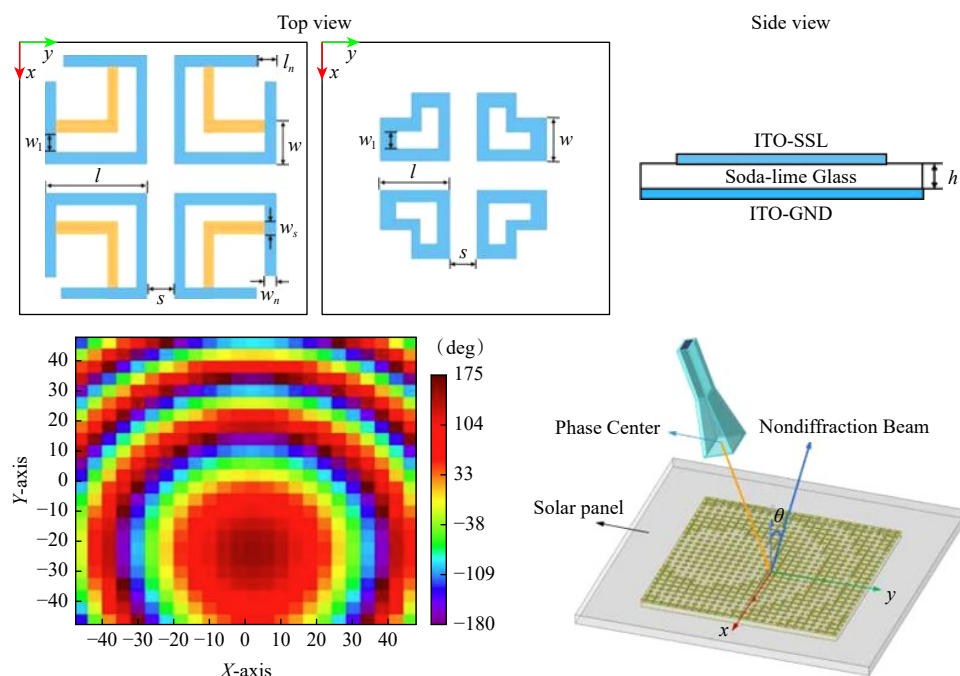


图3 用于产生零阶贝塞尔波束的反射型光学透明超表面



系统中进行高效微波功率传输。Zhao 等<sup>[34]</sup>提出了一种利用全息张量超表面产生具有柔性偏转方向、多波束、任意圆极化的贝塞尔波束的方法,与大多数工作中使用的只能调节等效标量阻抗长轴的单元不同,如图 4 所示,该结构的张量单元具有 3 个自由度,从而

使表面波的调制更加精确。实验结果表明,波束在距离超表面 300 mm 处的圆极化轴向比小于 3 dB,远场区域的双波束增益则为 16 dBi,交叉极化小于-16 dB,这种特性使其可用于复杂的近场电力传输和同时进行无线信息与电力传输。

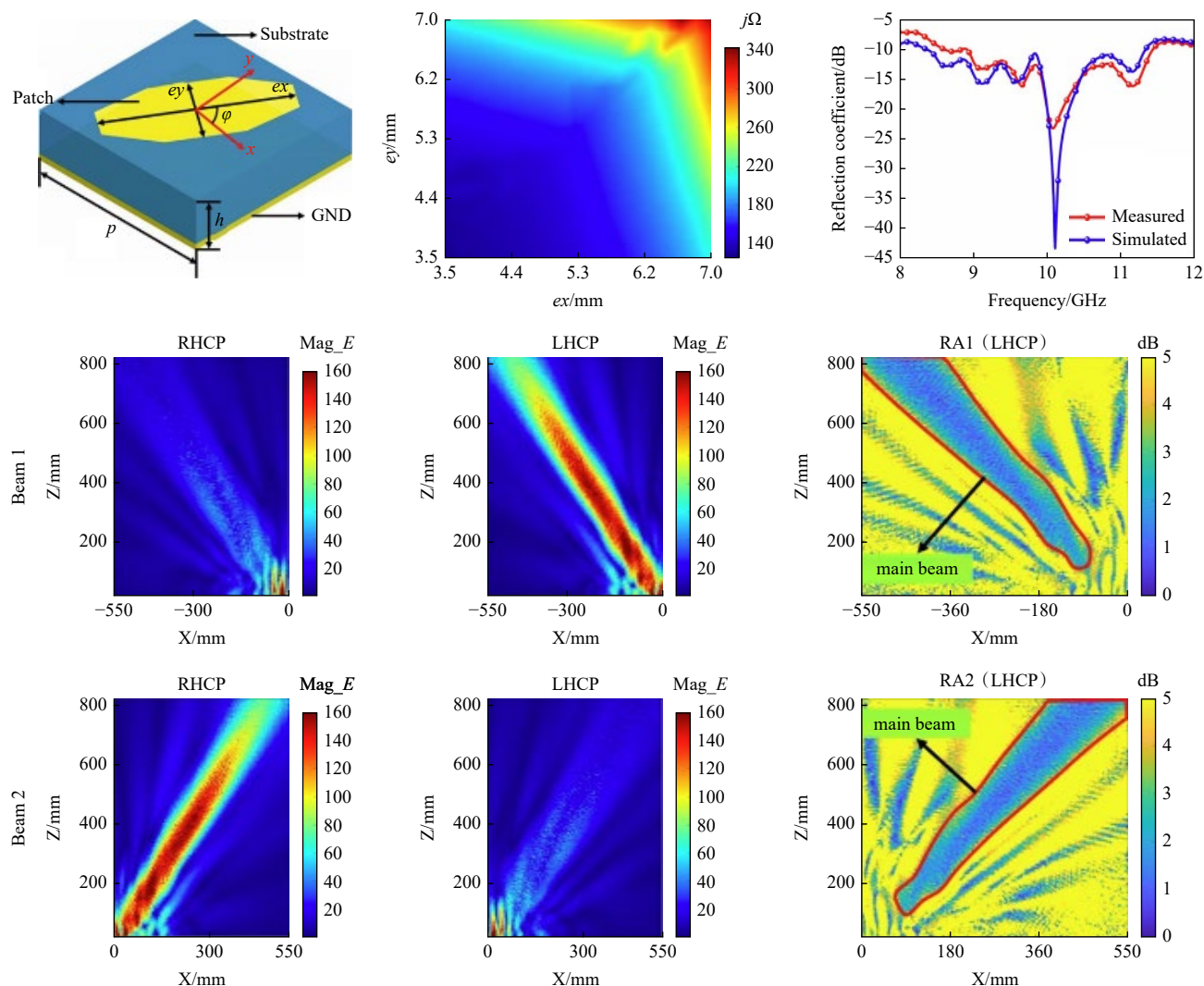


图 4 产生任意圆极化贝塞尔波束的全息张量超表面

考虑实际应用场景,很多研究工作存在的共同问题是最大电场强度位置总是偏离预设位置,导致焦点位置过近或者过远,使接收端接收到的能量密度很低。如果产生的电场可以限制在一个狭窄的通道内,保持功率不会损失太多,则可以使接收器得到更高的能量密度。Xiao 等<sup>[35]</sup>通过推导准非衍射波束产生不同光斑大小的几何相位计算表达式,计算所需的相位补偿并设计超表面单元,从而实现对波束光斑大小的调节。如图 5 所示,实验显示该 4 层超表面结构在

5.8 GHz 的工作频率下,距超表面 200~1000 mm 范围内的波束始终具有无衍射特性,通过调节变量  $d$  的大小,即可改变波束斑点尺寸。相比于单独的天线,加载该超表面的天线在同一位置向接收机发送的功率提高了 13 倍。Azarbahram 等<sup>[36]</sup>利用动态超表面天线对能量波束生成进行优化,用于最大限度降低发射功率,并满足多设备的能量收集需求,首先提出了一个数学模型用于捕捉动态超表面天线架构中频率相关的信号传播效应,再通过基于半正定规划和交替优化

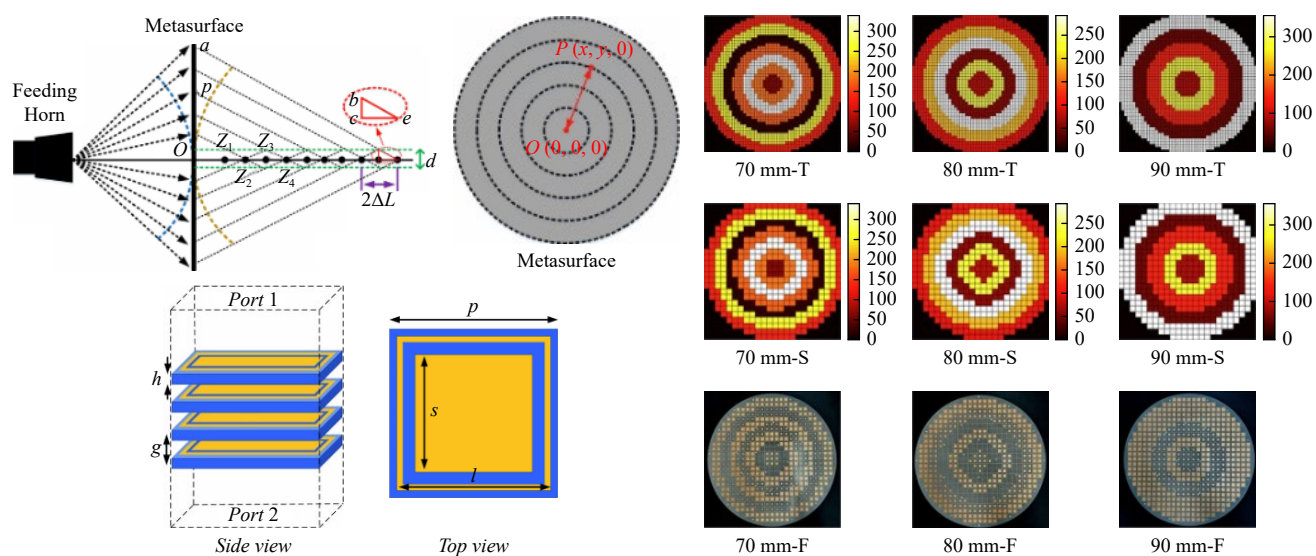


图5 用于准非衍射波束光斑尺寸调节和微波功率传输的超表面

的解决方案来使系统所需的发射功率随天线阵列的尺寸减小而减小,使动态超表面天线的发射功率随频率的提高而提高。总之,除研究无衍射波束的生成外,也需要关注如何使发射机的发射功率尽可能低,使接收机的接收功率尽可能高。

### 1.3 耦合谐振增强超表面

根据无线电力传输能量传输过程中中继能量形式的不同,可分为磁耦合式、电耦合式、电磁辐射式和机械波耦合式,因传输功率大、效率高,磁耦合式无线电力传输应用较其他方式更为广泛<sup>[37]</sup>。Hiep 等<sup>[38]</sup>利用一种可弯曲可折叠的超表面来提高工作在 13.56 MHz 磁耦合式无线电力传输系统的效率,如图 6 所示,超表面由 5 匝铜线圈组成单元,同时聚酰亚胺衬底的厚度仅有 0.1 mm,极薄的厚度赋予了超表面的高度灵活性,可以通过折叠超表面对角度和横纵向偏移量进行修正。实验结果表明,在发射线圈与接收线圈相距

250 mm 时,超表面的加入可以使效率从 30% 提升到 50.5%。Dellabate 等<sup>[19]</sup>利用共形超表面屏蔽外界磁场以提高无线电力传输系统效率,获得了 8 dB 的屏蔽效能,这项研究可以降低无线电力传输系统与其他电子设备的相互干扰,提高电磁安全。Wu 等<sup>[39]</sup>将超表面应用于移动无线电力传输系统中极化失配导致的效率下降问题,利用透射型线-圆极化变换器(linear-to-circular polarization converter, LCPC),将线极化入射波转换为左旋圆极化透射波,从而使接收天线在 0~90°极化角范围内,接收功率始终保持稳定。

在能量传输路径中加入超表面会导致系统质量和体积的增加,降低便携性。如图 7 所示,Chen 等<sup>[40]</sup>提出了一种用于无线电力传输系统的发射机嵌入式超表面。发射器所产生的所有磁场都得到嵌入式超表面的修正,使磁漏降低,从而使更多的磁力线通过接收器,用于在不占用额外体积的同时提高耦合系数

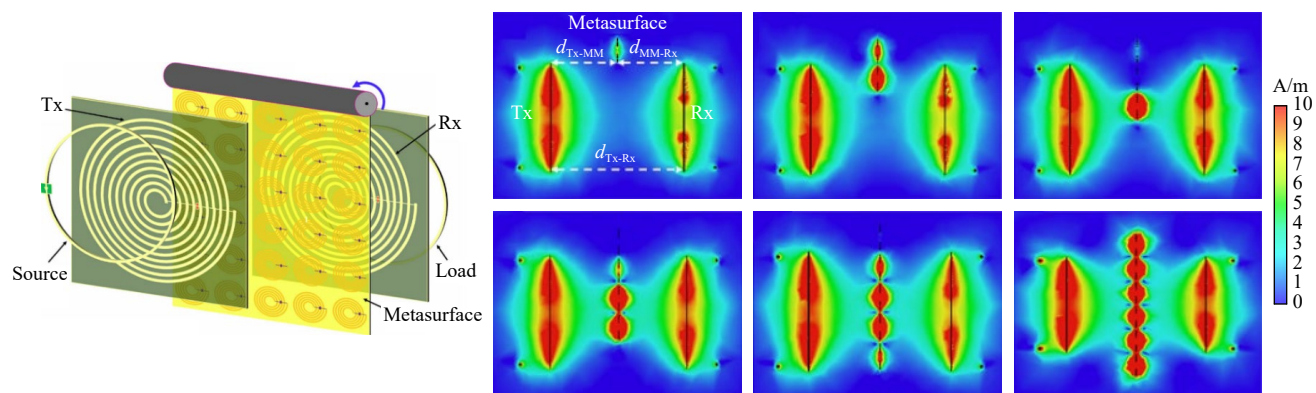


图6 用于磁谐振无线电力传输系统中的可弯曲可折叠超表面

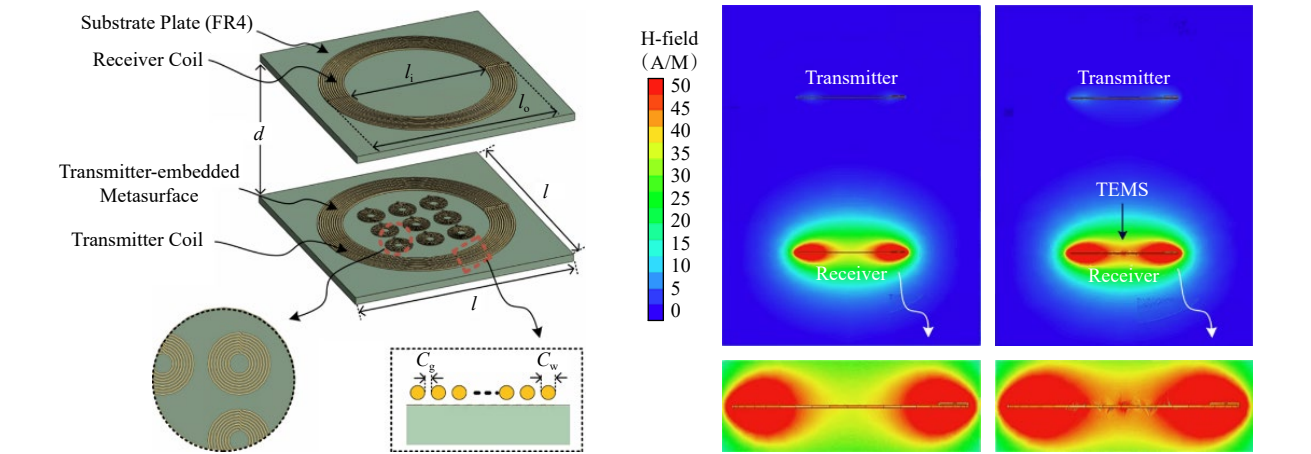


图7 发射机嵌入式超表面结构及有无超表面时的磁场强度对比

和能量传输效率。超表面对磁场的修正能力来自于其负磁导率特性,该研究团队用基于 L/C 的数学模型和参数化优化方法对超表面的负磁导率进行了理论支撑与验证。电容式无线电力传输的传输效率虽然不及磁耦合式,但由于其不需要电感耦合线圈,更加便宜便携,因此也有一定的应用空间。Rashid 等<sup>[41]</sup>

提出了一种用于移动机器人无线充电的低边缘场高功率密度电容式无线电力传输,如图 8 所示,超表面耦合器的形状为矩形,以最大限度地延长主、次侧充电垫的重叠大小,通过在耦合板周围的金属环引入气隙来实现电容耦合器,从而降低边缘电场。

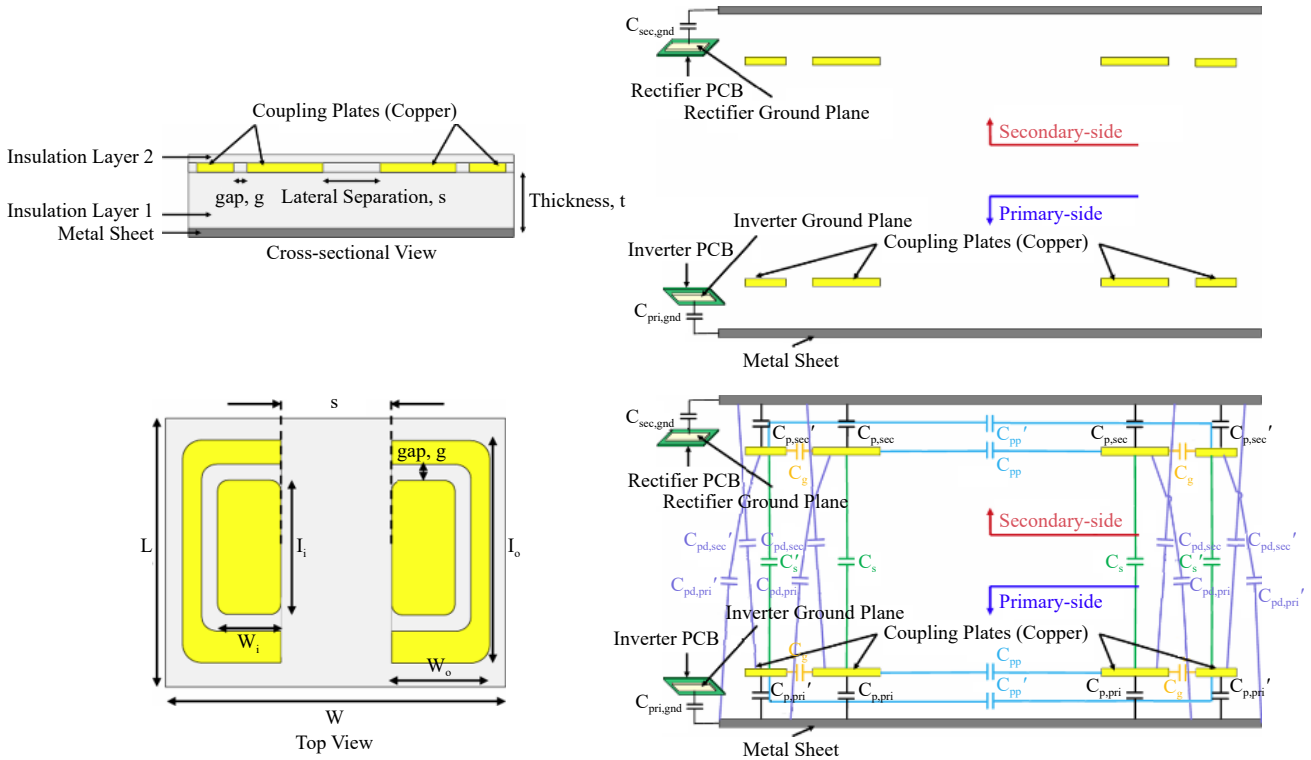


图8 基于超表面进行无线充电的移动机器人应用场景

## 2 无线能量收集超表面

能量收集超表面以其优秀的极化不敏感和入射角不敏感特性,可以很好地用在无线输能系统中的接收端。相比于传统的整流天线,结构紧凑的超表面更

适合应用于小型无线设备的可持续性供电。能量收集超表面通常用于捕获特定发射机发射的射频能量,器件在较高的入射功率下可以高效运行。为了捕获自然环境中遍布的天然射频能量,低入射功率能量收



集超表面研究使人们可以利用环境射频能源为低功耗无线传感器、可穿戴电子设备持续性供电<sup>[42]</sup>。在能量收集超表面的研究历程中,器件结构逐渐紧凑,接收效率逐渐提高,如今正在往一体化与多功能的方向上不断发展。

## 2.1 分段式能量收集超表面

早期研究简单地将电阻放置在超表面结构间隙或者通孔与接地背板之间,这种器件只有收集能力而没有转换和输出能力,对于能量收集,没有应用价值。因此有研究者通过额外的功率合成网络和整流电路,将单元收集到的能量合并后再整流为直流输出,即可为无线设备持续供电。Song 等<sup>[43]</sup>提出了一种宽入射角宽带能量收集超表面,由中心对称双环结

构组成的超表面可捕获中心频率为 6.1 GHz 的宽带射频能量,交流能量通过金属通孔输出,经过功率合成网络汇集后进入整流电路,射频-直流的收集效率最高可达 57%。Chang 等<sup>[44]</sup>创新性地提出简化整流电路的方法,如图 9 所示,超表面由亚波长八角形金属环组成,金属环中弯曲的凹槽可以有效抑制整流二极管产生的高次谐波,并消除整流电路中的低通滤波器模块,从而大幅简化设计工作。这种由功率合成网络和整流电路组成的能量收集超表面如今正向宽带、高效、入射角和极化角不敏感的方向发展,可稳定收集射频能量,但同时也有一系列缺点,例如结构复杂、能量损耗大、非线性元件会引起输入阻抗的变化等。

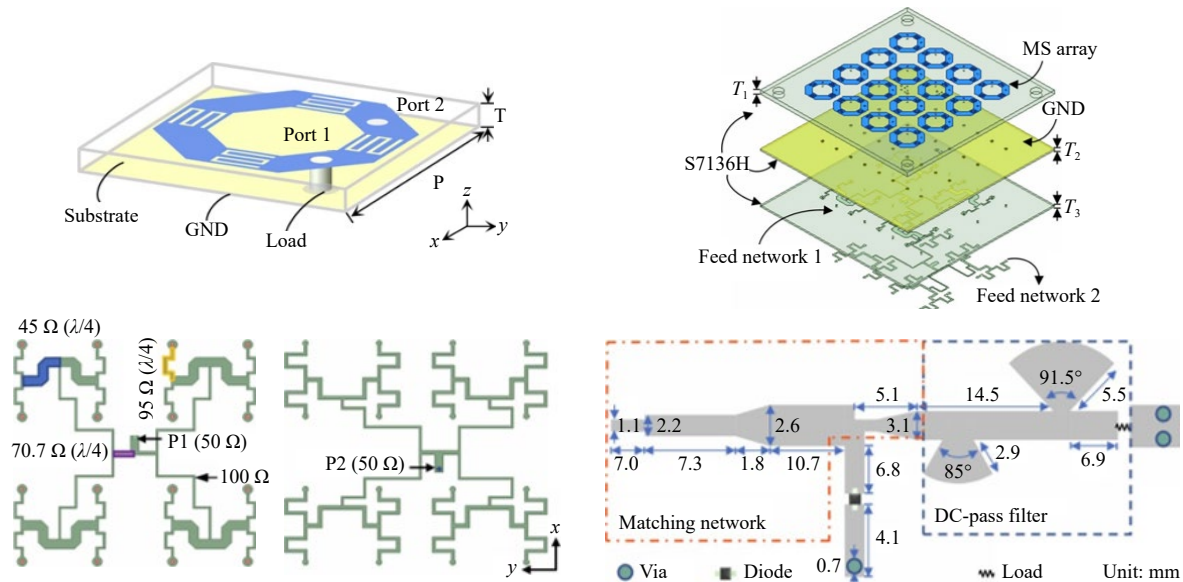


图 9 带有谐波抑制功能的能量采集超表面系统

## 2.2 一体化能量收集超表面

近年来,越来越多的研究者开始着手解决分段式能量收集超表面的设计繁琐、结构复杂等问题, Song 等<sup>[45]</sup>提出了一种阻抗匹配消除技术,利用超表面独特的高阻抗特性,直接将二极管置于超表面结构间隙中,省去功率合成网络和整流电路。超表面和二极管直接完成能量捕获、功率整合和交直流转换的工作。这为无线能量收集提供了新的方向,研究者称其为整流超表面。整流超表面的尺寸小,集成度高,设计流程简单,更适合用于为物联网系统中的小型设备供电,因此成为了近年来的热点研究方向。

Wang 等<sup>[20]</sup>设计了由指状组合型结构和方形环结

构组成的整流超表面,如图 10 所示,将整流二极管集成在结构中,在第二金属层中添加正交的直流偏置线,通过金属过孔连接肖特基二极管的阴极,从而提供直流电路径。该结构可以采集覆盖 2.4 GHz 无线局域网频段的射频能量,且具有极化不敏感的特点。Yu 等<sup>[46]</sup>利用 2 个具有宽阻抗带宽的正交阶梯状偶极子作为超表面单元,如图 11 所示,同样将整流二极管集成在偶极子间隙中,垂直与水平的偶极子分别作为主导偶极子和寄生偶极子,在不同频率处谐振,最终实现了(4.6~7.0) GHz 的宽带能量采集。实验表明该结构在工作频带内的能量采集效率始终高于 45%,在 5 GHz 处的峰值效率可达 63%。

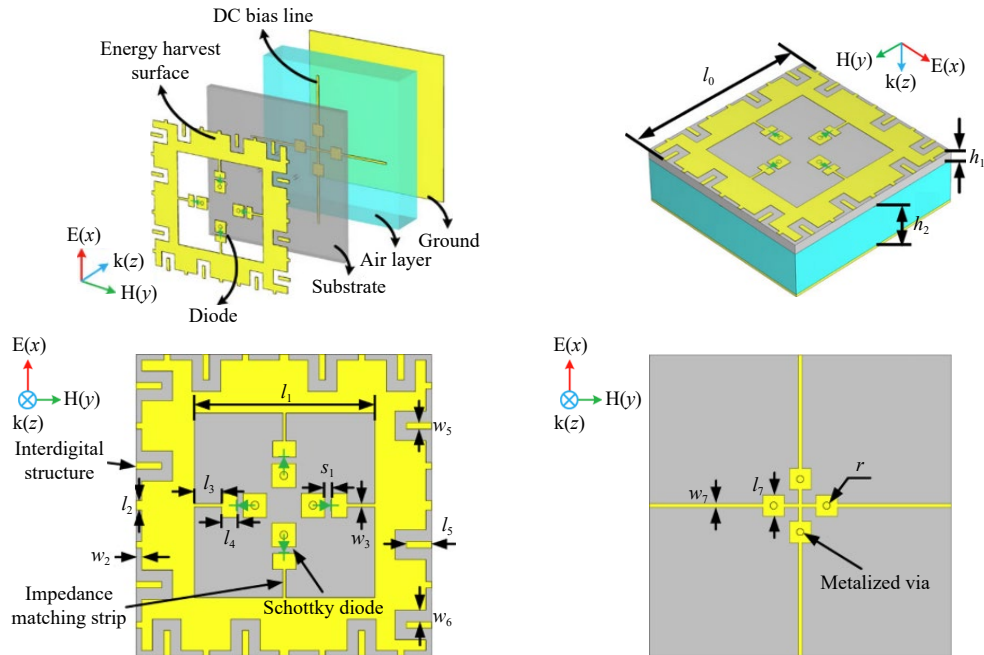


图 10 2.45 GHz 极化不敏感整流超表面

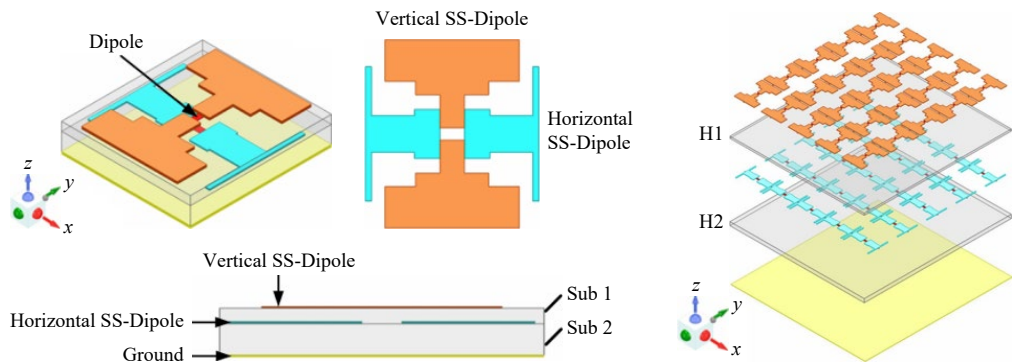


图 11 宽阻抗带宽的正交阶梯状偶极子整流超表面

绝大部分整流超表面采用刚性衬底，质量较大且灵活度差，部分研究者开始采用柔性衬底设计整流超表面。Gui 等<sup>[47]</sup>提出了一种柔性三频段极化不敏感整流超表面，柔性衬底采用聚酰亚胺，单元结构由方形贴片及多个 L 型槽组成。整流二极管与单元内部和单元之间的互联支路直接集成，可以消除复杂的阻抗匹配网络，输出功率低至 0 dBm 时，该结构在 3 个工作频率下能量收集效率均在 42% 以上，同时具有优良的共形能力，大大扩展了其应用场景。Lu 等<sup>[48]</sup>则将柔性可共形抗疲劳整流超表面系统(RMS)贴合在机翼背面，如图 12 所示，用于给无人机进行无线充电，柔性 RMS 的加入既能解决雷达散射和电磁干扰的问题，又能进行射频能量采集以回收辐射功率。整流超表面领域的研究，说明高集成度的能量收集超表面以

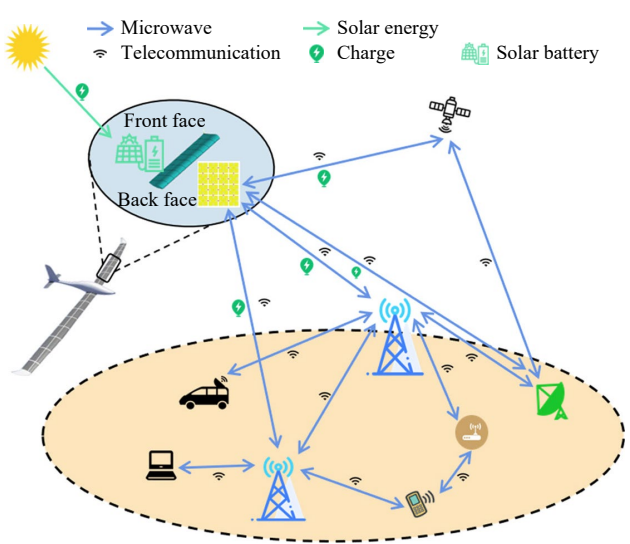


图 12 搭载柔性整流超表面的无人机辅助无线通信与互联网的应用场景



其轻量化、小型化等独特优势,具有相当广泛的应用前景,未来有望用于农业养殖中实时监测动植物指标、为人体植入式设备进行持续性供电和万物互联的智慧城市等场景。

### 2.3 多功能能量收集超表面

多功能器件意味着更多的应用场景,例如对于工作在单一波长的器件,在单元设计自由度充足的情况下,混合相位调控机制可以实现任意的极化和相位调控。此结论在成像、全息、偏振光学等领域均有广泛应用<sup>[49]</sup>,同样,利用超表面对电磁波的极化、相位调控特性也可以实现多功能能量收集超表面。通过极化敏感的超表面单元设计,对以特定极化角入射的电磁波引入独立的相位调控,从而实现极化复用的多功能器件,是超表面相较于传统光学元件的优势之一。Zhang 等<sup>[50]</sup>提出了利用极化敏感超表面估计线极化入射电磁波极化角的方法,如图 13 所示,通过在正交方向布置 2 个相同的能量收集超表面,分别捕获入

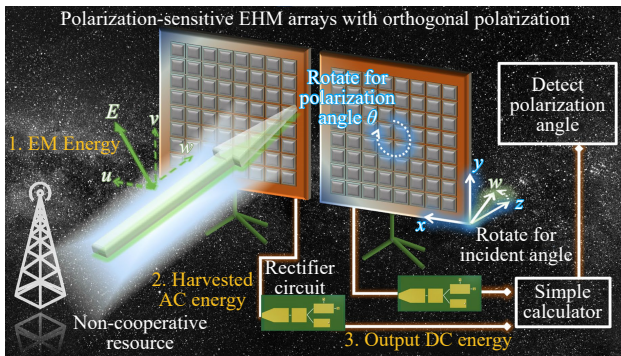


图 13 具有极化检测功能的极化敏感能量收集超表面

射电磁波的 2 个正交电磁分量,并将其整流为直流电压,引入极化检测电压比参数,从而实现高精度的极化角检测。实验表明该结构同时具有优秀的能量采集效率和高精度极化检测能力,有望用于慢时变特性辐射源的极化检测和极化跟踪。

调控电磁波的另外 2 个重要特性:相位与幅度,即可使超表面具有改变接收的电磁波波束方向的能力,从而实现波束转向与波束定位。如图 14 所示, Kumar 等<sup>[51]</sup>利用注意力神经网络(SANN)在 12.5 GHz 频段贴片天线的上层设计超表面,以实现波束转向能力和射频能量收集功能。通过逆时针方向旋转超表面,光束可以定向到特定方向,如 10°、15°、18°、21°和 23°,同时可以在 8 kΩ 的负载电阻上获得 1.1 V 的直流输出电压。作者创新性地利用深度学习设计多功能能量收集超表面,结合神经网络的编码、注意力机制、模式合成技术和结构指导等诸多优势,自动生成具有精准波束控制和自主能量操纵能力的超表面单元。

为了使超表面的工作频段或者调控能力可调谐,一些研究者用机械调节的方法使超表面具有多功能特性。Yang 等<sup>[52]</sup>提出了一种可通过调节离子液滴高度进行频率调谐的多功能能量收集超表面,如图 15 所示,结构由氧化铟锡、有机玻璃和 1-乙基-3-甲基咪唑二脒胺盐离子液滴组成,通过调节氧化铟锡导电玻璃间离子液滴的厚度,实现对结构工作频率的调谐。离子液滴或者超表面的高度增加,会使吸收带宽向低频移动,器件可输出的正负峰值电压分别为 77.2、-295.2 mV。在实际应用环境中,超表面受到环

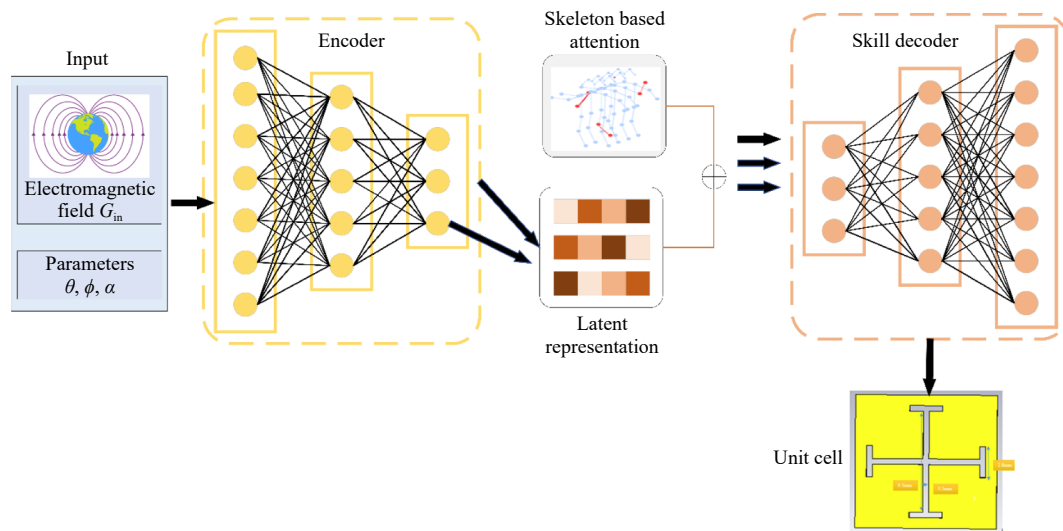


图 14 利用深度学习设计兼具波束转向与能量收集功能的超表面方法

境振动的影响,可以同时实现不同吸收带宽的切换以及能量的收集和转换功能。但是该可调谐多功能能量收集超表面最大的问题在于制备困难,需要用激光

刻蚀技术加工超表面图案,采用自旋镀膜法将疏水材料均匀涂覆在上层导电玻璃,同时对离子液滴的位置和体积都有严格要求。

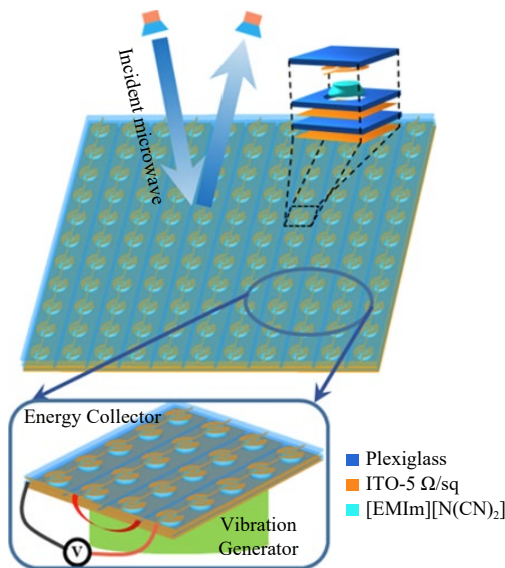
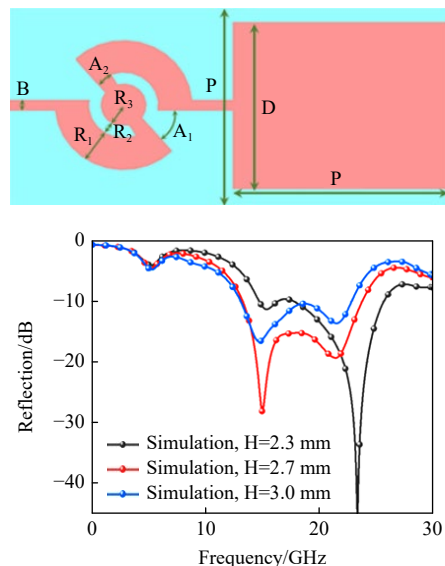


图 15 利用离子液滴振动调节高度的可调频多功能复合超表面



### 3 同步无线信息与电力传输超表面

在 19 世纪末,开始有科学家用电磁波做无线通信实验,逐步发展到如今影响到每个人的无线通信技术。电磁波既能传输能量又能传输信息,二者一直被分开研究,分别形成无线电力传输和无线信息传输技术。随着 IoT 技术的发展,无线设备需要大量的电能和数据流量,从而导致频谱拥挤和供电困难等问题,为了解决这些问题,同步无线信息与电力传输技术(simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)得到了迅速发展。Varshney 等<sup>[53]</sup>在 2008 年首先提出这一概念,并用理论公式对工作过程进行了演绎,定义了最大信息速率-功率传输函数,旨在为功率与信息的权衡提供理论指导。在此基础上,有研究者分析了 SWIPT 中信道速率、信道容量和能量传输效率之间的关系<sup>[54]</sup>,提出了时间交换和功率分集 2 种接收方案。随后,天线领域的研究人员提出了极化分集和频率分集的 SWIPT 方案,即信息和能量分别由不同极化或者频率的电磁波携带。

#### 3.1 功率分配理论

SWIPT 系统理想的接收机可以使相同的信号同时传输到能量接收器与信号解码器,但目前还没有实

用电路可以实现这种操作,传统的接收机通过与耦合器、馈电网络的集成实现功率分集,将接收信号中特定比例的能量传输到能量接收器进行供电,将剩余能量传输到信号解码器进行解调与信息交换。这种形式一般采用多端口整流天线作为能量接收器,其庞大而复杂的馈电网络增加了器件尺寸,天线通常也只能接收特定方向、特定极化的入射波,而利用超表面天线和整流超表面进行集成,使得小型化功率分集器件成为可能。

Yu 等<sup>[55]</sup>利用上述功率分集方案进行 SWIPT 系统的设计,超表面通信天线和整流超表面共用同一个接地平面,分别用于无线通信与能量收集,实现了直流射频信号与信息在空间域上的分离,而不需要设计额外的功率分集器或耦合器。该结构通过改变蚀刻槽在地面上的宽度来调节直流功率和信息的比例,用于整流为直流输出和用于信息传输的功率比例的高度可调性,使得器件可以灵活地用在更多的工作场景中。然而,该工作有着只能实现单目标单频率能量采集与无线通信的缺点。正如在提出 SWIPT 概念时就已经涉及到的问题,如何平衡能量与信息的分配比例,很大程度上影响着系统的工作效率,如图 16 所示,Chen 等<sup>[25]</sup>深入研究了传感、通信与供电之间的基

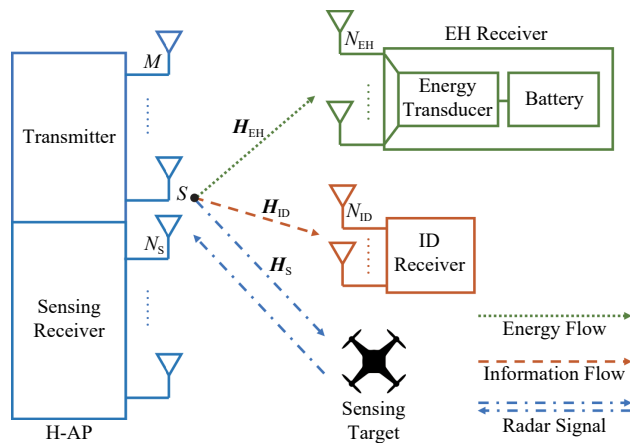


图 16 集成传感、通信和 SWIPT 的多功能无线系统

本性能的权衡限制,结合集成传感、通信和 SWIPT,研究出了一种集无线传感、通信和供电为一体的多功能多输入多输出(multiple in multiple out, MIMO)系统,并对雷达传感目标模型定义了 Cramer-Rao 界限-速率-能量(C-R-E)区域,通过最大化信息解码接收器的可实现速率来表征其帕累托边界,并根据能量接收器的最低能量收集需求和发射端的最大发射功率约束等因素求解方程,得到最优的 C-R-E 区域边界,即在传感-通信-供电之间得到了最好的平衡。

在完整的 SWIPT 系统设计工作中,需要考虑信号的解调。一般来说,集成接收机会对接收到的信号进行整流,然后将整流后的信号分成电源支路和通信支路,此时,进入通信支路的信号已经不再具有相位信息而只有强度信息,直流偏置解调技术可以从这类信号中解调出信息,但也会面临着频谱效率减半以及互调失真等风险。为了获得速率与能量之间的最佳折衷,调制形式根据目标传输速率的变化而实时变化是最有效的方式,利用循环对称复高斯随机向量和通断键控有望实现这一功能,使未来功率分集 SWIPT 技术更加可靠和成熟。

### 3.2 极化分集方案

信息和能量可以通过电磁波在一个频率上的 2 个正交极化来传输,这大大降低了频谱消耗,使整流器和接收器的尺寸尽可能缩小,并在一定程度上解决功率分集方案中权衡能量收集与信息速率的挑战。Liu 等<sup>[56]</sup>提出了一种基于各向异性超表面场的多目标极化分集 SWIPT 方案,利用各向异性超表面单元与场合成算法,设计出了能够独立调制双线极化波的超

表面,如图 17 所示。超表面可以独立调制  $x$  极化波与  $y$  极化波,从而可以利用  $x$  极化波承载无线电力,利用  $y$  极化波承载信息,实现信息与电力的协同传输。作者使用场合成算法同时提取超表面单元的幅值响应和相位响应,代入传播算子中以模拟真实的超表面辐射,这使得超表面具有单馈多焦和双馈多焦的辐射特点,可以应用于多目标 SWIPT 场景。

完整系统的设计可以有效提高超表面工作时的抗干扰能力和能量与信息传输效率,如图 18 所示,作者将用于生成贝塞尔波束的全息张量超表面与一个具有高隔离度的双极化接收超表面结合形成一个小 SWIPT 系统<sup>[57]</sup>,全息张量超表面用于产生 2 种极化的无衍射贝塞尔波束,从而使系统在有障碍物的环境中保持较高的功率传输效率,通过调整全息张量超表面中张量单元,即可以根据接收机的最大接收功率和整流器的最小整流功率,灵活调节极化功率的分配。该系统有着集成无线传感器网络、通信模块和人工智能算法,构建智慧城市的应用前景,但是全息张量超表面的不可调谐使得 2 种不同极化波的功率比例被固定而无法实时调节,限制了系统的应用场景,搭建可调谐的 SWIPT 系统将成为未来的发展趋势。

### 3.3 频率分集方案

超表面的工作频率一定程度上由其物理尺寸决定,频率分集超表面能够在相同孔径的要求下实现不同的工作频率,可以在 SWIPT 系统中发挥重要作用,这是传统的反射天线阵列无法实现的。全息成像与 SWIPT 都是多频超表面的热点应用,Zhang 等<sup>[58]</sup>通过 3 层的经典开口谐振环结构实现全空间复振幅超表面,可以在 2 个不同频率处产生 2 个不同的高质量全息图像。改变开口谐振环的外径等尺寸可以实现频率调节,改变开口谐振环的开口尺寸和开口方向角则可以独立实现相位和幅度调制。Kudaibergenova 等<sup>[59]</sup>利用紧凑超材料组成了双频工作的 SWIPT 系统,如图 19 所示,系统通过耦合 2 个具有缺陷结构的谐振器工作,2 个谐振器由 2 个结构相似、尺寸不同的单谐振结构级联组成,从而实现双频工作的特性。该系统分别在 405 和 900 MHz 工作,可以使 SWIPT 效率分别提升 14% 和 7%。每个频段可以分别或同时进行信息与功率传输,在频谱资源充足时,可以利用低频传输信息、高频传输能量;在充电需求紧张时,



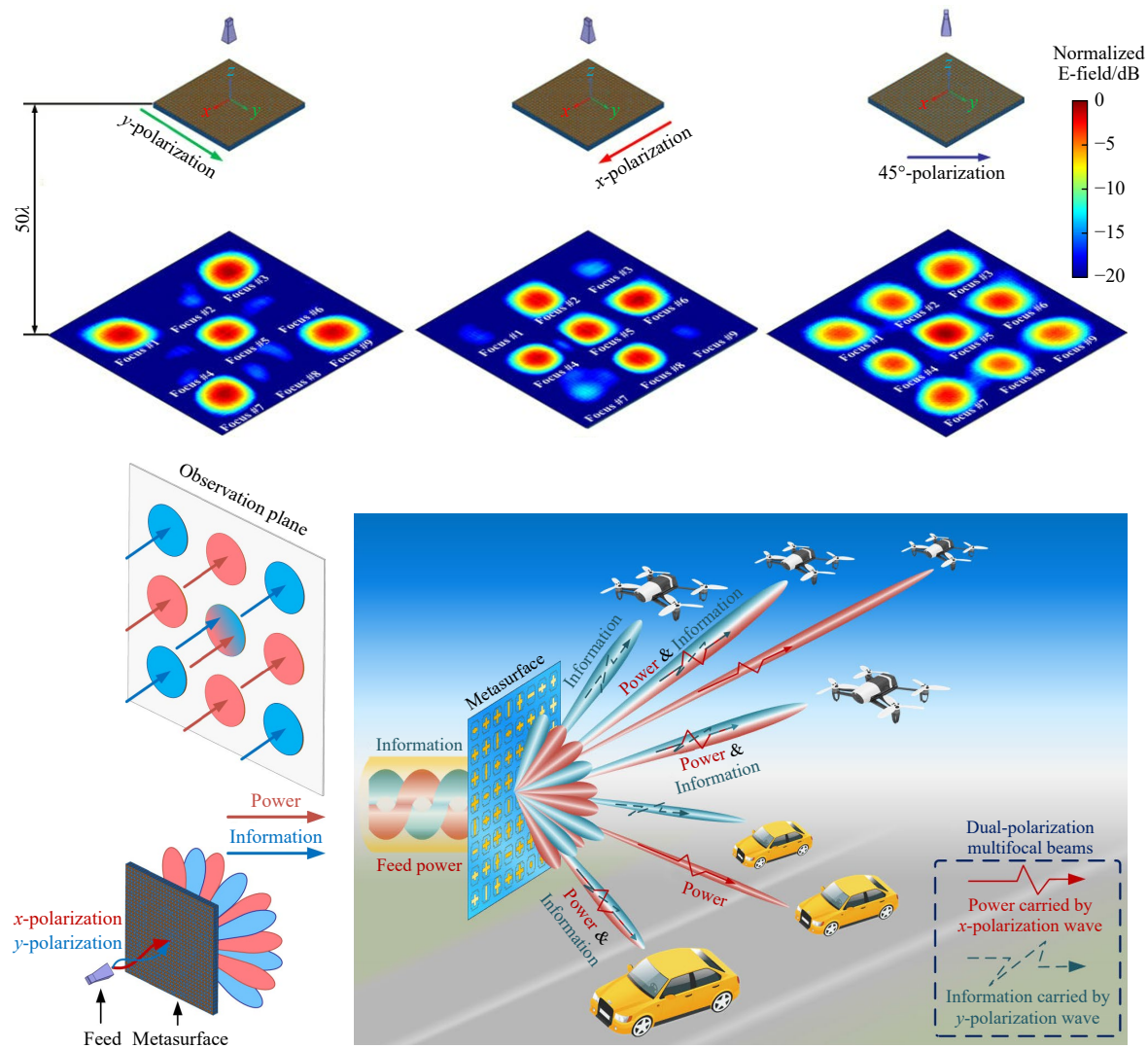


图 17 基于各向异性超表面场的多目标 SWIPT 系统

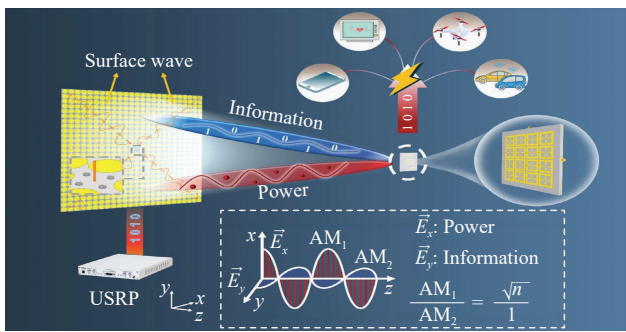


图 18 全息张量超表面结合极化分集接收超表面形成的 SWIPT 系统

可以用 2 个频段同时传输能量;在频谱资源不足时,可以用单个频段同时传输能量与信息,这种双频 SWIPT 特性使其在 IoT 系统的低功耗传感器方向有广泛的应用前景。

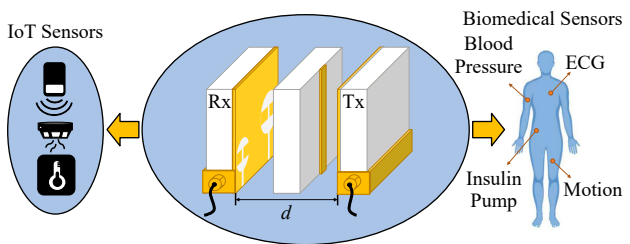


图 19 双频 SWIPT 系统

4 可重构无线输能超表面

可重构智能超表面(reconfigurable intelligent surface, RIS)通过控制电路及控制器对结构中的本征半导体 PIN 结二极管(PIN 二极管)、石墨烯等进行动态控制,实现对入射电磁波不同的响应,赋予了超表面高度的灵活性,被认为是第六代移动通信(6G)中的关键技术之一。RIS 能够在不同频率、不同相位、不同

时空、不同极化和不同幅度下操纵电磁波,因此非常适合独立传递信息和能量,将其与无线输能和 SWIPT 技术融合,势必会为 IoT 和 6G 的发展起到重要作用<sup>[60]</sup>。一般来说, RIS 需要外部有线电源或电池来激活其调制能力,光控超表面技术是解决电源问题的一个方法,但是其性能会受到自然光和距离等环境因素的极大影响。射频能源分布广泛且十分稳定,可以提供连续和稳定的直流偏置,因此将 RIS 与无线输能技术进行合理的融合,有望实现自供电 RIS。

#### 4.1 无线电力传输辅助 RIS

Mu 等<sup>[61]</sup>首先提出了自供电 RIS 的概念, RIS 通过电磁散射实现能量和信息的自适应调节,而射频能量采集是通过整流超表面吸收能量实现,二者在机制上是背道而驰的,因此需要利用频率分集或者极化分集以实现多功能。如图 20 所示,作者提出的超表面单元上 PIN 二极管用于柔性相位调制,能量收集端口用于独立的射频能量收集,  $y$  极化波入射时,能量收集模块可将直流从 25 个输出端口输出到 PIN 二极管中,从而改变 PIN 二极管的开关状态,实现对  $x$  极化波入射时产生不同的反射相位。这使得 RIS 不需要任何外部电池或者有线电源即可实现不同方向的动态调节,具有了所谓的“无限寿命”。

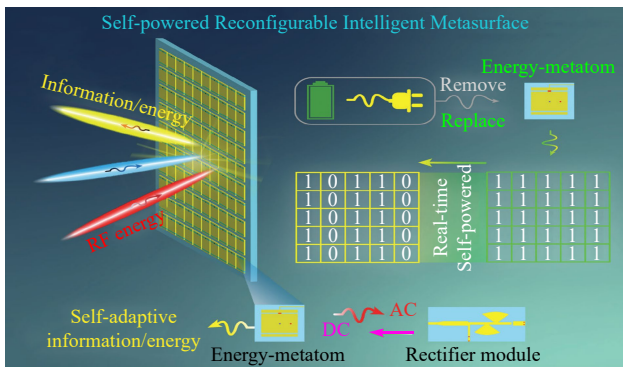


图 20 具有“无限寿命”自供电 RIS

事实上,环境中的射频能级较低,可能不足以维持 RIS 的正常运行,无法实现真正意义上的“无限寿命”。但是利用无线电力传输技术为 RIS 远程供电,可以使其真正摆脱外部电池或者有线电源。Chang 等<sup>[5]</sup>提出了自供电信息-能量超表面,如图 21 所示,它具有 2 种不同的工作模式。在模式一下,频率为  $f_1$  的信号源照射超表面,此时超表面通过选择性地激活或停用集成在器件中的 PIN 二极管,实现相位模式的灵

活动态调节,操纵无线信道。在模式二下,频率为  $f_2$  的信号源照射超表面,此时器件转变为能量超表面,高效吸收来自周围环境的射频能量。射频能量经过整流与稳压后转换为直流能量,为 RIS 的控制器提供连续稳定的直流偏置,从而允许其可靠运行。整流器和稳压电路集成在系统中,消除了对外部电源的需求,实现自我维持的功能。与传统 RIS 相比,自供电信息-能量超表面具有硬件结构简单、成本低的特点,有效地消除了有线束缚,有望解决盲区覆盖等问题,具有良好的商业价值。

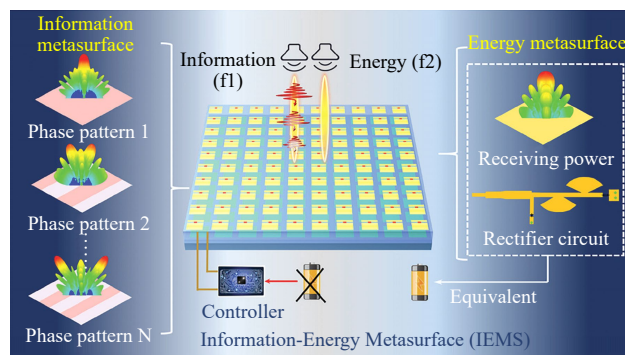


图 21 自供电信息-能量超表面

#### 4.2 RIS 辅助无线电力传输

无线电力传输技术的发展,使得无线充电不再是仅存于畅想中的愿景,目前已有许多设备可以进行无线充电,但事实上,这些设备仍然需要放置在充电板上,若设备与充电板上的线圈没有完全对齐,会严重影响充电速率。利用 RIS 辅助无线电力传输,可以实现动态目标的无线充电,获得更大的充电范围并适应充电设备的移动性。Chen 等<sup>[62]</sup>将 RIS 集成到基于磁耦合的无线充电系统中,如图 22 所示,所使用的 RIS 可以在正、负磁导率之间自由切换,从而可以将发射端产生的磁场实时聚焦到接收端,这使移动目标始终能接收到较高的能量密度,进行稳定的无线充电。为了确定 RIS 更加精确的位置,作者对接收端的反馈实时监控,并确保在发射端产生适当的交流源信号,最终可以在 50 W 的输入功率下,对 1 m 处的移动目标进行实时无线充电。

基于磁耦合的无线充电系统效率严重依赖于 2 个谐振线圈的相对位置,这限制了其在远距离多目标无线充电的应用。Li 等<sup>[16]</sup>提出了一个完整的亚波长尺寸无线电力传输框架,如图 23 所示,由 4 个部分



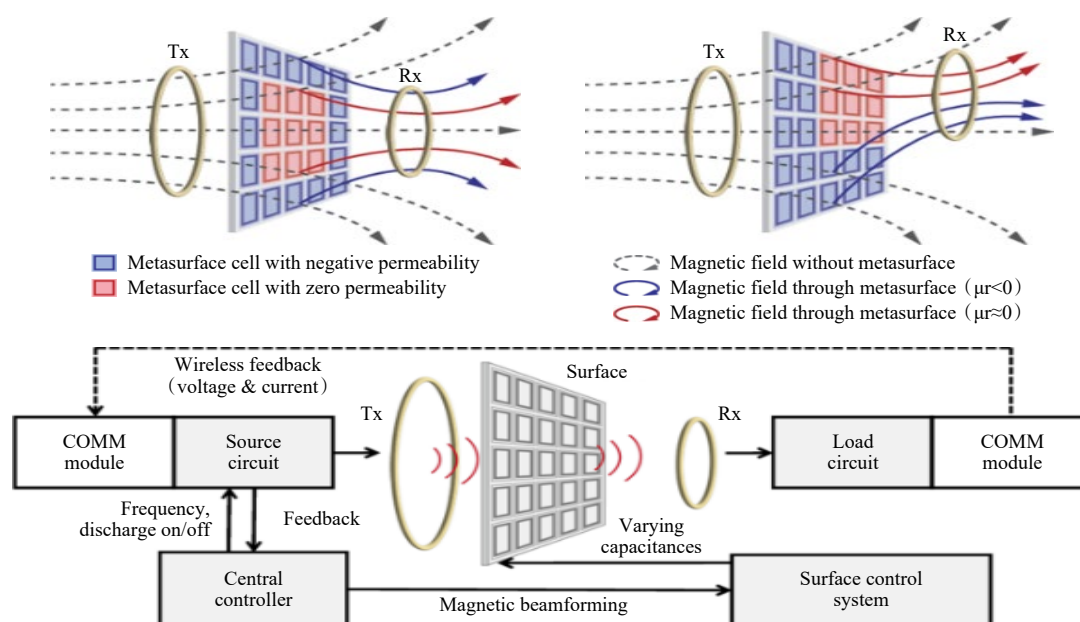


图 22 超表面辅助小型移动设备的远程无线充电

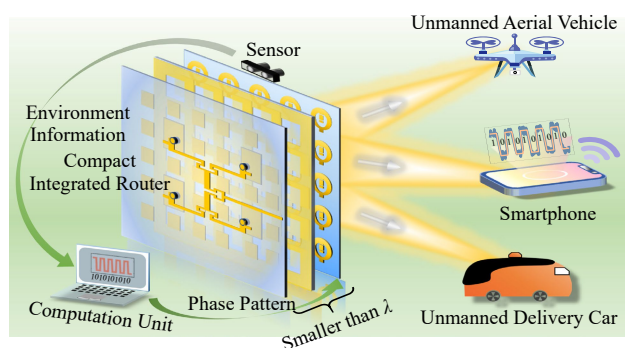


图 23 完整的亚波长尺寸无线电力传输无线充电系统

组成: 紧凑型近场馈线、动态波束生成器、环境传感器和智能计算单元。紧凑型近场馈线可以在近场产生均匀波前, 从而激发动态波束生成器产生定向波束, 同时, 动态波束生成器是一种时空编码 RIS, 环境传感器与智能计算单元可以生成相位图来控制 RIS 向动态目标实时传输功率。作者所提出的框架虽然设计过程复杂, 但是依旧保证了低成本和小型化等优点, 具有完整的工作流程和极高的可行性, 适用于动态多目标的无线充电和信息传输, 有望推动超表面无线传输路由器的商业化。如图 24 所示, Xia 等<sup>[26]</sup>利用双频超表面结合时空编码和卷积神经网络提出了一种自适应无线供电网络, 与传统 MIMO 阵列和基于摄像头的定位系统不同, 在自适应无线供电网络工作过程中, 整流器的二次谐波作为定位的反馈信号, 提取时空编码谐波的振幅分布用于训练卷积神经网络模型, 神经网络即可在定位过程中进行快速分类并实时

将能量束对准终端, 以实现稳定的能量传输。这种结合无线定位、目标分类、能量束生成的超表面有较强的环境适应性和稳定性, 将推动 IoT、智能超表面和机器人产业的发展。

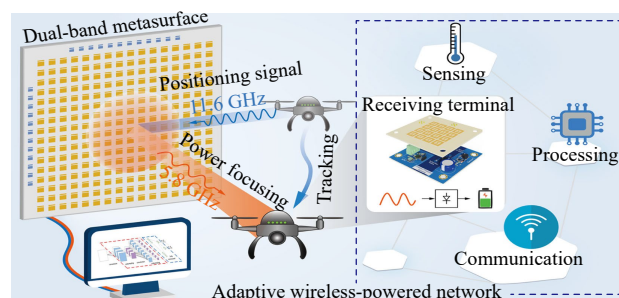


图 24 自适应无线供电网络

RIS 辅助的无线电力传输技术和无线电力传输辅助的 RIS 技术充满创造性与应用前景, 但事实上二者都存在一定的缺点, 自供电 RIS 面临着无线能量传输效率远低于有线传输方式, 以及能量收集仅依赖于单极化超表面等问题。至于基于 RIS 的无线自适应充电系统, 除了受限的充电距离外, 当进行多运动目标同时无线充电时, 如何提供实时反馈和有效的能量分配将面临重大挑战。尽管如此, RIS 与无线输能技术的融合, 都有着重要研究意义, 是智能无线输能领域的新范式。

#### 4.3 RIS 辅助 SWIPT

在动态的器件与动态的目标下, 权衡能量功率与信息速率是技术难点, Huang 等<sup>[63]</sup>对动态超表面天线



辅助的 SWIPT 下行系统中的功率收集要求和速率最大化问题进行了深入的理论研究,通过提取天线的信号模型与近场信道模型,利用加权最小均方误差、分块坐标下降法将动态超表面天线权值和数字预编码向量的优化问题等效为非凸优化问题,最终通过理论计算完成对二者的联合优化,最大限度地提高信息传输速率,同时保证能量采集要求。这项工作的主要应用场景在于同时保证近场多用户的信息速率和能量接收效率,有望用于 MIMO 系统。

IoT 无线设备无处不在,能量与信息也需要全空间覆盖, Yaswanth 等<sup>[64]</sup>提出了同时传输和反射(simultaneous transmitting and reflecting, STAR-RIS)的新概念,超表面可以同时传输与反射不同形式的电磁波,实现全空间覆盖,还研究了 STAR-RIS 辅助的 SWIPT 系统中的资源分配问题。研究思路是在保证信息接收器的最小速率要求和能量接收器的最小能量收集约束的前提下,设计 SWIPT 系统在基站处的发射波束矩阵和 STAR-RIS 处的传输与反射系数,并将重点放在发射功率最小化问题上,以实现绿色通信。如图 25 所示, Zheng 等<sup>[65]</sup>提出了 RIS 辅助的 SWIPT 和无线计算联合学习系统,从器件选择、发射波束形成、功率分配、接收波束形成和 RIS 系统设计方面制定一个联合学习-优化问题,利用基于交替优化和连续凸逼近技术的 2 阶段算法来依次进行下行 SWIPT 和上行无线计算子问题,正因为 RIS 赋予 SWIPT 系统更多的主动性,才更加需要研究波束成形、发射功率最小化、多用户 MIMO 等问题, IoT 也对 SWIPT 系统提出了鲁棒性的要求,以较小的发射功率实现多设备、多用户的稳定无线通信与功率传输,是未来 RIS 辅助的 SWIPT 系统的重要研究方向。

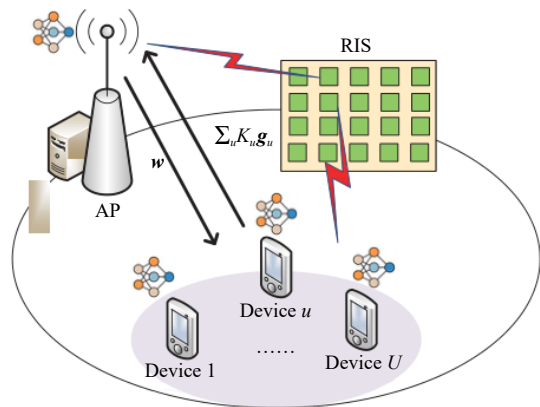


图 25 RIS 辅助的 SWIPT 和无线计算联合学习系统

## 5 结论

无线输能超表面发展迅速,促进了无线充电技术的发展,使庞大的物联网系统中众多用电设备摆脱供电线缆的束缚不再是畅想。无论是在系统发射端的波束生成,在能量传输路径上的波束聚焦、耦合增强与电磁屏蔽,还是在系统接收端的能量收集,都有超表面的身影。超表面以其紧凑高效的特性和强大的电磁波调控能力,势必会在无线输能技术中得到更深入的研究与应用。无线通信技术的融合,开启了信息与电力同步传输的新范式,在智慧城市、智慧农业和可穿戴设备等领域显示出了强大的潜力。可重构智能超表面的加入,将动态目标定位、定向波束生成等结合到无线充电技术中,动态多目标无线充电的研究为物联网注入了新的活力。

对于无线输能超表面的未来发展,可以结合以下几个方面考虑:(1) 将工作在能量传输路径中的超表面调整到与发射端或接收端集成,减小系统体积并提高灵活性;(2) 进一步抑制能量波束损耗,并尽可能降低障碍物对能量波束的干扰,提高传输效率;(3) 开发超低功率能量收集超表面,使利用环境射频能量为无线设备进行永久可持续供电成为现实;(4) 将可重构智能超表面与同步无线信息与电力传输技术深度融合,权衡信息速率与能量功率的比例,为无线输能技术赋予更强的操作性、更高的灵活性和更广泛的应用场景。

## 参考文献(References)

- [1] Liu X T, Xu S L, Tang B, et al. Indoor organic photovoltaics for low-power Internet of Things devices: Recent advances, challenges, and prospects[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 497: 154944.
- [2] Das J P, Nardekar S S, Ravichandran V, et al. From friction to function: A high-voltage sliding triboelectric nanogenerator for highly efficient energy autonomous IoTs and self-powered actuation[J]. *Small*, 2024, 20(48): 2405792.
- [3] Lee B, Kim J, Jo H, et al. Arrangement free wireless power transfer via strongly coupled electrical resonances[J]. *Advanced Science*, 2025, 12(2): 2407827.
- [4] Si L M, Niu R, Dang C Y, et al. Advances in artificial intelligence for artificial metamaterials[J]. *APL Materials*, 2024, 12(12): 120602.

- [5] Chang M Y, Mu Y J, Han J Q, et al. Tailless information-energy metasurface[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(21): 2313697.
- [6] 司黎明, 陈璐璐, 孙厚军, 等. 涡旋波超表面研究现状与应用进展[J]. *科技导报*, 2024, 42(12): 107-124.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [11] 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.
- [12] Li X M, Zhao Y, Lu R P, et al. Full-space trifunctional metasurface with independent control of amplitude and phase for circularly polarized waves[J]. *Nanophotonics*, 2024, 13(24): 4471-4481.
- [13] Overvig A, Mann S A, Alù A. Spatio-temporal coupled mode theory for nonlocal metasurfaces[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 28.
- [14] Rossi M, Zhang L, Chen X Q, et al. Machine-learning-enabled multi-frequency synthesis of space-time-coding digital metasurfaces[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(40): 2403577.
- [15] Tang P C, Si L M, Yuan Q Q, et al. Dynamic generation of multiplexed *Vortex* beams by a space-time-coding metasurface[J]. *Photonics Research*, 2025, 13(1): 225.
- [16] 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(1): 2807.
- [17] Li M Y, Khaleghi A, Hasanvand A, et al. A new design and analysis for metasurface-based near-field magnetic wireless power transfer for deep implants[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(5): 6442-6454.
- [18] Xiong H, Yang Q, Huang Y Z, et al. A high-efficiency hybrid microwave power receiving metasurface array with dual matching of surface impedance and phase gradient[J]. *Applied Physics Letters*, 2024, 125(4): 043901.
- [19] Dellabate A, Lazzoni V, Monorchio A, et al. Arbitrarily conformal metasurfaces for enhanced wireless power transfer systems[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 64376-64384.
- [20] Wang H Y, Cheng F, Yang Y, et al. A polarization-insensitive rectifying surface for 2.4 GHz WLAN band RF energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(9): 7135-7145.
- [21] Dong L, Si L M, Liu B Y, et al. An optically transparent rectifying metasurface for 2.4/5.8 GHz dual-band RF energy harvesting[J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(1): 011705.
- [22] Du J X, Wang R M, Zheng P Y. A 2.4 GHz high-efficiency rectifier circuit for ambient low electromagnetic power harvesting[J]. *Sensors*, 2024, 24(21): 6854.
- [23] Argote-Aguilar J, Wei M D, Hutu F D, et al. Wide power range RF energy harvester for powering ultralow-power devices[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(10): 5632-5642.
- [24] Sharma R, Ngo T, Raimondo E, et al. Nanoscale spin rectifiers for harvesting ambient radiofrequency energy[J]. *Nature Electronics*, 2024, 7(8): 653-661.
- [25] Chen Y L, Hua H C, Xu J, et al. ISAC meets SWIPT: Multi-functional wireless systems integrating sensing, communication, and powering[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 8264-8280.
- [26] Xia D X, Han J Q, Mu Y J, et al. Adaptive wireless-powered network based on CNN near-field positioning by a dual-band metasurface[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 10358.
- [27] Costantino T, Miretti F, Spessa E. Assessing the viability of dynamic wireless power transfer in long-haul freight transport: A techno-economic analysis from fleet operators' standpoint[J]. *Applied Energy*, 2025, 379: 124839.
- [28] Wu Q Q, Guan X R, Zhang R. Intelligent reflecting surface-aided wireless energy and information transmission: An overview[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2022, 110(1): 150-170.
- [29] Yu Z, Zhao T L, Yue S S, et al. Quantification phase gradient near-field focusing metasurface for microwave wireless power transfer system[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(6): 1944-1948.
- [30] Falchi M, Usai P, Brizi D, et al. Design of a low-frequency magnetic metasurface for extremely focused and long range wireless power transfer applications[C]//Proceedings of 2024 18th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2024: 1-4.
- [31] Xiong H, Yang Q, Huang Y Z, et al. High-efficiency microwave wireless power transmission via reflective phase gradient metasurfaces and surface wave aggregation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(44): 60189-60196.

- [32] Kondakci H E, Abouraddy A F. Diffraction-free space-time light sheets[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(11): 733–740.
- [33] Dong J Q, Zhang J L, Zhang X X, et al. Design of optically transparent metasurface for microwave wireless power transmission with a nondiffractive beam[C]//Proceedings of IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT). Sendai, Japan: IEEE, 2024: 312–315.
- [34] Zhao S H, Zhang S, Xue H, et al. Generation of Bessel beam with controllable circular polarization and direction using holographic tensor metasurface[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(3): 985–989.
- [35] Xiao H, Zhang H Q, Su D P, et al. Metasurface antenna designed for quasi-nondiffraction beam size adjustment and microwave power transmission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(8): 2426–2430.
- [36] Azarbahram A, López O L A, Souza R D, et al. Energy beamforming for RF wireless power transfer with dynamic metasurface antennas[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(3): 781–785.
- [37] Guo Q L, Koo J, Xie Z Q, et al. A bioresorbable magnetically coupled system for low-frequency wireless power transfer[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(46): 1905451.
- [38] Hiep L T H, Bui H N, Tung B S, et al. Enhanced efficiency of magnetic resonant wireless power transfer system using rollable and foldable metasurface based on polyimide substrate[J]. *Applied Physics A*, 2024, 130(7): 521.
- [39] Wu J H, Xiao H, Zhang H Q, et al. A broadband and wide-angle linear-to-circular polarization converter for mobile microwave wireless power transmission[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(6): 1734–1738.
- [40] Chen Y X, Zhao X, Niu S X, et al. A transmitter-embedded metasurface-based wireless power transfer system for extended-distance applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 39(1): 1762–1772.
- [41] Rashid S S, Etta D, Ciabattini M, et al. A high-power-density reduced-fringing-field multi-MHz capacitive wireless power transfer system[C]//Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA: IEEE, 2024: 1187–1194.
- [42] Luo T W, Kong L L, Lu J J, et al. Neuron-inspired flexible phase change materials for ambient energy harvesting and respiration monitoring[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(50): 2411820.
- [43] Song C W, Wei Y Q, Wang J Y, et al. A wide-angle incidence, broadband rectified metasurface for radar frequency band EM energy harvesting and wireless power transfer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 174: 110544.
- [44] Chang M Y, Li Y C, Han J Q, et al. A compact polarization-insensitive rectenna with harmonic suppression for wireless power transfer[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(1): 119–123.
- [45] Song C Y, Huang Y, Zhou J F, et al. Matching network elimination in broadband rectennas for high-efficiency wireless power transfer and energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(5): 3950–3961.
- [46] Yu F, Yang X X, Gao S. Broadband polarization-insensitive rectifying metasurface toward battery-free sensors[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(1): 139–143.
- [47] Gui H H, Xie H P, Deng L W, et al. Triple-band and polarization-insensitive rectifying metasurface with flexible substrate[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, 57(16): 165003.
- [48] Lu P, Xia Y K, Lei E P, et al. Airborne flexible rectifying metasurface system for wirelessly powered unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(10): 7710–7721.
- [49] Yin Y Y, Jiang Q, Wang H B, et al. Multi-dimensional multiplexed metasurface holography by inverse design[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(21): 2312303.
- [50] Zhang Y, Huang R Z, Wang G, et al. A low-cost polarization detection approach enabled by energy harvesting metasurface: Concept, design, and experiment[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2024, 72(10): 6174–6186.
- [51] Kumar M V, Sharma D. A metasurface antenna with beam steering capabilities for radio frequency energy harvesting[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2024, 118: 109443.
- [52] Yang F L, Zhu X Q, Wang T, et al. Multifunctional metasurface integrating tunable microwave absorption and energy harvesting[J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 34855.
- [53] Varshney L R. Transporting information and energy simultaneously[C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2008: 1612–1616.
- [54] Zhou X, Zhang R, Ho C K. Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(11): 4754–4767.
- [55] Yu F, Yang X X. Spatial power-splitting metasurface for simultaneous wireless information and power transfer[C]//



- Proceedings of IEEE Wireless Power Technology Conference and Expo (WPTCE). Kyoto, Japan: IEEE, 2024: 451–453.
- [56] Liu H X, Wu X N, Xue H, et al. Multitarget simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) scheme based on anisotropy-metasurface field synthesis[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(11): 8466–8475.
- [57] Liu H X, Li Y C, Cheng F J, et al. Holographic tensor metasurface for simultaneous wireless powers and information transmissions using polarization diversity[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(2): 2307806.
- [58] Zhang Z Y, Zhou Y L, Li S J, et al. Optically transparent complex-amplitude metasurface for full-space manipulation of frequency-multiplexed holographic imaging[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(47): 65635–65644.
- [59] Kudaibergenova Z, Dautov K, Hashmi M. Compact metamaterial-integrated wireless information and power transfer system for low-power IoT sensors[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 92: 176–184.
- [60] Psomas C, Ntougias K, Shanin N, et al. Wireless information and energy transfer in the era of 6G communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2024, 112(7): 764–804.
- [61] Mu Y J, Chang M Y, Wang X, et al. A self-powered reconfigurable intelligent metasurface[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2024, 9(6): 2301896.
- [62] Chen L L, Yu B Z, Fu Y J, et al. Pushing wireless charging from station to travel[C]//Proceedings of the 30th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2024: 46–61.
- [63] Huang K L, You L, Qian M Y, et al. MetaSWIPT: DMA-assisted multi-user MISO downlink simultaneous wireless information and power transfer[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2024, 13(4): 1048–1052.
- [64] Yaswanth J, Katwe M, Singh K, et al. Toward green communication: Power-efficient beamforming for STAR-RIS-aided SWIPT[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024, 8(4): 1545–1563.
- [65] Zheng G Y, Fang Y T, Wen M W, et al. Novel over-the-air federated learning via reconfigurable intelligent surface and SWIPT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(21): 34140–34155.

## Hot spots of wireless energy transfer metasurface technology

SI Liming<sup>1,2,3</sup>, MA Tianyu<sup>1,2,3</sup>, DANG Chenyang<sup>1,2,3</sup>, LIU Boyang<sup>1,2,3</sup>, SUN Houjun<sup>1,2,3</sup>, LÜ Xin<sup>1,2,3</sup>

1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing 100081, China

3. State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-space, Beijing 100081, China

**Abstract** With the development of wireless communication and artificial intelligence technology, the number of small mobile devices is increasing rapidly, and the traditional wired power supply model can no longer meet people's requirements for portability and mobility. Radio frequency and microwave wireless energy transfer technology can get rid of the limitation of wired power, and has a greater application potential in wireless devices. Metasurface is a new kind of artificial material, which has unique advantages like regulating electromagnetic parameters and two-dimensional compact conformal. It is expected to play a key role in radio frequency and microwave wireless energy transfer. In wireless energy transfer systems, metasurface can generate energy beam at the transmitting terminal, enhance coupling resonance in the transmission path, and improve AC-DC conversion efficiency at the receiving terminal. So this paper took stock of the hot spots of this technology, and introduced the advanced scientific progress of wireless energy transfer integration wireless communication, wireless sensing, reconfigurable intelligent surface and target recognition & localization. The hot spots of wireless energy transfer metasurface technology, including wireless power transfer, wireless energy harvesting, simultaneous wireless information and power transfer, and reconfigurable wireless energy transfer technology.

**Keywords** wireless energy transfer; wireless power transfer; wireless energy harvesting; simultaneous wireless information and power transfer; reconfigurable intelligent surface ●



(责任编辑 徐丽娇)