

超表面多波束天线技术及其 在无线能量传输中的应用^①

蒋之浩*, 李 远*

(东南大学 信息科学与工程学院 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘要:自上世纪60年代无线能量传输首次成功的实验验证以来,该技术已成为电子科学与技术多个子领域的热门研究方向。近年来,在物联网、移动通信、和新能源汽车等变革式迅猛发展的推动下,智能电子和电气设备数量激增,无线能量传输技术的开发和成熟显得日益重要,其应用变得更加广泛。无线能量传输主要基于磁感应、谐振耦合、以及电磁辐射三种机理,现有的绝大多数研究集中在基于近场感应和耦合式的能量传输,无法满足很多广域场景下的充能要求,因此,高效中远距无线能量传输方案的解决成为当务之急。由亚波长单元构成的电磁超表面剖面低、损耗小、具有强大的电磁波调控能力,可实现低成本的菲涅尔区和远场区多波束聚焦,给无线能量传输带来了新的思路和方法。文章主要对超表面多波束天线技术进行介绍,包括对已有工作的整理和归纳,以及对其在无线能量传输中潜在应用的展望。

关键词:无线能量传输;电磁超表面;多波束天线;

中图分类号:TN702 文献标识码:A 文章编号:1674-7135(2020)02-0082-10

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2020.02.014

Metasurface Multibeam Antenna Technology and Its Application in Microwave Wireless Power Transfer

JIANG Zhihao*, LI Yuan*

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

Abstract: Ever since the first successful experimental demonstration of wireless power transfer in the 1960s, this technology has becoming a hot research topic in the field of electronic science and engineering. In recent years, with the evolutionary development of the internet of things, mobile communications, and new-energy vehicles, the number of smart electric and electronic devices has been growing with a unprecedentedly fast pace. The development of wireless power transfer technology is of great importance, due to its widespread potential applications. The wireless power transfer can be classified into three categories, namely the magnetic induction, resonant electromagnetic coupling, and electromagnetic wave radiation. Most exiting research activities on wireless power transfer focus on first two methods, which however cannot meet the needs in more complex and long-range scenarios. Hence, the high efficiency mid-/far-range wireless power transfer is becoming more and more critical. Metasurfaces, which are composed by sub-wavelength building blocks, can provide powerful capability in manipulating the behaviors of electromagnetic waves, which can facilitate the design of multibeam antennas with focused beams in the Fresnel or far-field regions, with a low profile, light weight, and low loss, thus bringing new ideas and path for wireless power transfer.

① 收稿日期:2019-12-17;修回日期:2020-01-14。

作者简介:蒋之浩(1986—),博士/教授,主要研究方向为微波/毫米波天线与电路、电磁超表面。

E-mail: zhihao.jiang@seu.edu.cn;

李远(1994—),主要研究方向为微波/毫米波反射/透射阵天线、电磁超表面。E-mail: yuanli@seu.edu.cn

In this paper, the metasurface-based multibeam antenna techniques are presented, including a revisit of the reported works and their applications in wireless power transfer.

Key words: Microwave power transmission; Solar power stations; Rectenna

0 引言

自 19 世纪末期起,人类便开始了对采用无线方式进行电能传输的探索,尼古拉·特斯拉作为此领域的先驱,在 1899-1901 年间进行了多次实验,虽然由于经费短缺而以失败告终,但却为后人敲开了无线能量传输的技术之门^[1]。

随着第二次世界大战期间微波技术的发展,特别是微波段高功率真空管的发明,使得在微波频段将大功率波束传递到远处成为可能。1963 年,美国雷神公司的威廉姆斯·布朗首次实验验证了工作于微波频段的无线能量传输系统,并在 1964 年成功地用无线方式驱动了一架直升飞机模型^[2]。

20 世纪 70 年代,人类对微波无线能量传输的兴趣迎来了一个高峰,开始探讨采用此技术在地球上不同区域之间、以及地球和空间站之间进行大功率能量输送的可能性^[3-4]。

出于对安全和效率的考虑,近距无线能量传输在最近几十年也开始逐步走进人们的视野,并且随着物联网、移动通信、新能源汽车等领域的迅猛发展,以及智能电子电气设备的高度普及,近距无线能量传输技术被深入的开发,并且在近年内逐步成熟到可以商业应用的程度^[5-6]。

其应用涉及无线安保和门禁、可植入医疗设备、只能电话和手表、智能家居、电动汽车等多个领域,预期将在不久后深入人类生活和工作的各个角落。

无线能量传输主要可以分为三类,包括近距无线能量传输、近中距无线能量传输、以及中远距无线能量传输^[7]。

其中,如图 1(a)所示,近距无线能量传输主要依靠磁感应现象实现^[8-9],通过将两个线圈面对面靠紧放置,通过磁通量的交变在接收线圈中产生感应电流,从而实现能量传输,虽然传输距离远小于线圈直径,仅为毫米级,但传输效率高、传输功率大。

近中距无线能量传输主要依靠电磁谐振耦合实现^[10],如图 1(b)所示,其充电距离可以等于线圈直径、甚至达到线圈直径的数倍,可实现米级传输距离,且效率依然可达到 75% 以上。

对于第三种中远距无线能量传输,如图 1(c)所

示,主要通过电磁波的辐射将能量从发射端传送到接收端^[11],其距离可以达到几个甚至几千个波长,实现千米级传输距离,无疑可以极大地拓展无线能量传输的应用性。

然而,由于电磁波在空间中与距离平方成正比的传播损耗,远距无线能量传输的效率较低,且对周围环境的电磁污染较大,因此相比于前两种无线能量传输模式,中远距无线能量传输目前仍处在研究阶段,距离商业化还有较长的路要走。

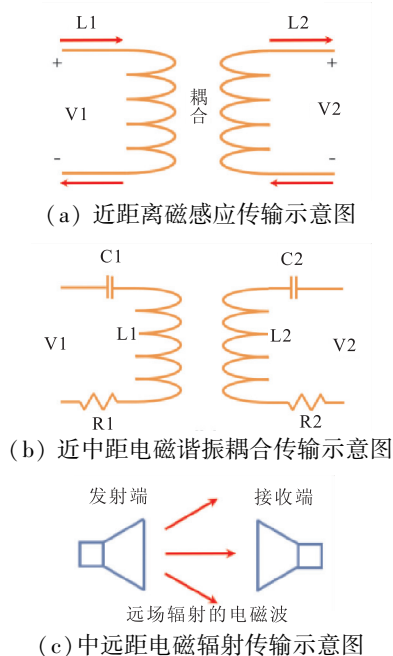


图 1 不同传输距离的无线能量传输原理示意图

Fig. 1 Schematics of different types of wireless power transmission techniques

超表面是由亚波长单元按周期或非周期排列而成的人工电磁表面结构^[12],其中每个单元的电响应、磁响应、各向异性等特性均可以独立控制,对电磁波的传导、辐射、散射等特性可以实现几乎任意的调控,且剖面低、损耗小、可共形,这些使得超表面不仅能够大幅提升现有电磁器件的性能,更可以获得传统器件无法实现的新功能。

特别地,在波前控制方面,超表面展现出强大的波前重塑能力,可以对反射波或透射波在远场区域

和近场区域的幅度、相位、和极化分布进行精确的控制^[13-15]。

对于无线能量传输而言,超表面强大的波前控制能力可以在基于电磁辐射的中远距无线能量传输中发挥巨大作用,形成多个远场或近场聚焦波束,本文主要介绍就基于超表面的多波束天线技术,对目前已有的工作进行介绍和总结,并探讨其在中远距无线能量传输中的应用,最后总结并展望。

1 超表面多波束天线

在基于电磁辐射的中远距无线能量传输中,需要将发射端的能量以电磁波为载体聚焦在远场区域(又称夫琅禾夫区)或辐射近场区域(又称菲涅尔区)内的特定位置,这就需要辐射近场聚焦天线远或远场高定向波束天线^[16]。

此外,由于很多应用场景中存在多个接收端同时接收能量传输的需求,因此,传统通信系统中的多波束天线^[17](包括多波束近场聚焦天线和多波束远场定向天线)可以被应用到多用户无线能量传输中。下面,我们将对基于超表面的多波束天线进行介绍。

1.1 反射式和透射式相移超表面

为了形成多个远场高定向波束或多个近场聚焦波束,所用超表面需要将馈源天线的辐射波前进行转换,在超表面的每个单元对反射波或透射波产生一定的相移,从而在超表面的出射口面形成所需的近场分布,完成波束成形。此类波束成形超表面主要分为反射式和透射式两种。

如图2(a)所示,反射式超表面一般有多层由介质基片隔开的金属层,且位于底部的金属层为一个连续的金属地板,达到反射所有能量的目的^[18-20]。

在地板上方的金属层由亚波长单元构成,单元与单元之间可以没有任何电连接或有细导体相连,从而获得容性或感性的单元间耦合。

对于透射式超表面单元,如图2(b)所示,不存在这样的金属地板,且为了同时实现高效率的电磁波透射和相移,金属层的层数必须多于一层^[21-23]。不论反射式还是透射式的超表面单元,其每个单元金属层的结构均可以由长方形贴片、细长的偶极子、环形线圈、金属缝隙槽、或具有其它几何形状的金属结构组成,提供所需的分布式电容和电感。为了实现双极化响应,可采用各向同性的单元结构,比如圆形贴片、十字形偶极子、十字形缝隙等,而为了拓展

工作带宽,可以使用多谐振结构或多层结构^[24-25]。

从相移的产生方法上分类,反射式/透射式超表面单元可分为两类。第一类相移称为动态相位相移^[27],此类相移主要针对线极化波,当超表面单元内部结构的尺寸大小改变时,每个单元的谐振频点会发生偏移,从而改变反射或者传输相位。第二类相移称为旋转相位相移^[28],此类相移主要针对圆极化波,当超表面单元为各向异性单元,且沿其两个光轴方向的线极化反射/透射相位相差180度的时候,可将一束圆极化入射波会转换为具有同样手性的圆极化反射波或具有相反手性的圆极化透射波,类似一个反射/透射半波片。

将这样的各向异性超表面单元以其几何中心为轴进行旋转,对于反射的同手性圆极化波和投射的反手性圆极化波,可以获得两倍于旋转角的相移,且对于左旋和右旋圆极化入射波,所产生的相移互为相反数。

根据广义斯涅尔和广义菲涅尔定理^[29],具有不同相移的反射式/透射式超表面单元放在一起时,每个单元所产生的反射波/透射波的相位不一样,便可实现对反射或透射电磁波的偏折。这两种相移的主要差别在于,基于动态相位可应用于线极化和圆极化波,但其相移值随频率变化而改变,而旋转相位的相移是非色散的,但其只可以用于圆极化波。最近的研究表面,同时利用动态相位和旋转相位,可以实现对左旋和右旋圆极化波的相移的独立控制,从而实现双圆极化波束成形^[30-31]。

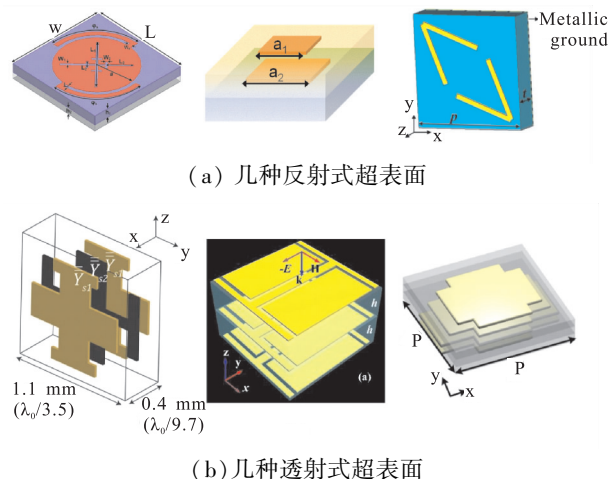


图2 反射式与透射式超表面单元结构

Fig. 2 Structures of reflective and transmissive metasurface unit cells

1.2 远场高定向多波束超表面

为了实现远场高定向波束超表面,超表面上的每个单元需首先补偿馈源天线所发射的球面波到达超表面输入面的相位差,然后再施加一个线性梯度相位,形成二次辐射,将波束旋转到目标角度。当目标波束不止一个的时候,可将多个相位分布进行线性叠加,形成多焦相位分布。此类单馈源多远场高定向波束超表面在微波段和毫米波段都被实验验证,包括线极化和圆极化的反射式以及透射式多波束超表面^[32-37]。

如图3(a)所示,使用一个线极化喇叭天线照射一个单极化反射式超表面,当该超表面上的矩形贴片单元的大小呈一维或二维的一比特相位分布时,可以获得多个高定向性线极化反射波束^[32]。

此方法还可用于圆极化波,如图3(b)所示,馈源为一个Ka波段圆极化喇叭天线,超表面由两层金属层构成,下层为一个金属地板,上层为正方形贴片阵列,每个单元具有不同的边长以提供不同的各向同性的反射相位。可以看到,所实现的四个高定向波束的副瓣仿真值均小于 -25dB ,而测量值也小于 -20dB ,比单纯使用相位叠加的方法实现的四个波束的副瓣低很多,这是由于采用了交替映射算法对超表面单元的相位分布进行了优化^[33]。

最近,如图3(c)所示,研究人员将此优化方法和旋转相位单元结合,高效率地实现了圆极化多铅笔波束和圆极化多赋形波束,且每个波束的增益可以独立设定,这对单个发射源同时对多个处于不同方位和距离的设备进行无线能量传输中具有重要意义^[37]。

单馈源多定向波束的好处在于一个发射端可以同时为多个接收端传输能量,但是在多个接收端不是全部需要接受能量的情况下,会造成能量损失,导致总效率大幅下降。因此,具有多馈源、且每个馈源对应一个定向波束的多馈源多波束超表面天线显得更加灵活多变,可以适用于更多不同的场景,虽然系统的复杂度变高了^[38-42]。

如图4(a)所示,此线极化多馈源多波束天线采用了双层耶路撒冷十字形结构作为超表面动态相位单元以及7个基片集成波导馈电的四贴片线极化天线作为馈源,从而可以实现覆盖 $\pm 30^\circ$ 的7个定向波束^[40]。若在超表面设计中采用旋转相位单元,并且将馈源阵列换成圆极化天线阵列,则可以实现多馈源多圆极化波束。

如图4(b)所示的超表面天线具有可覆盖 $\pm 33^\circ$ 的5个圆极化定向波束,且每个波束的带宽约为20%^[42]。

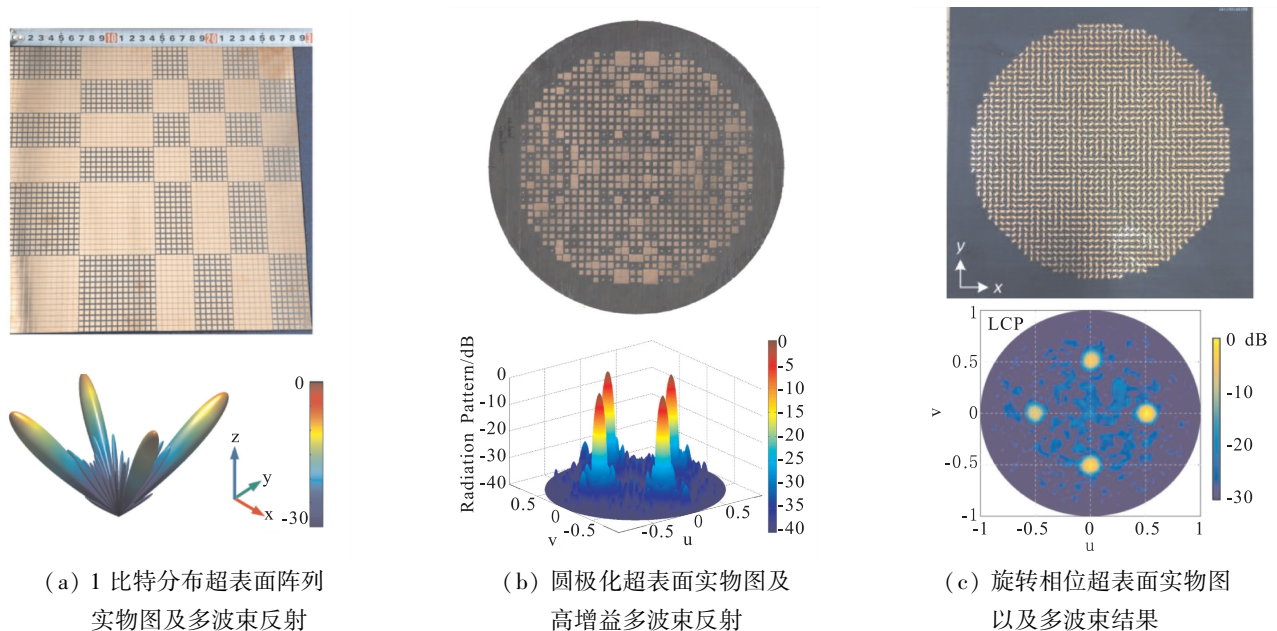


图3 工作在远场的高定向性多波束超表面

Fig. 3 Single-feed multi-beam metasurfaces for far-field focusing

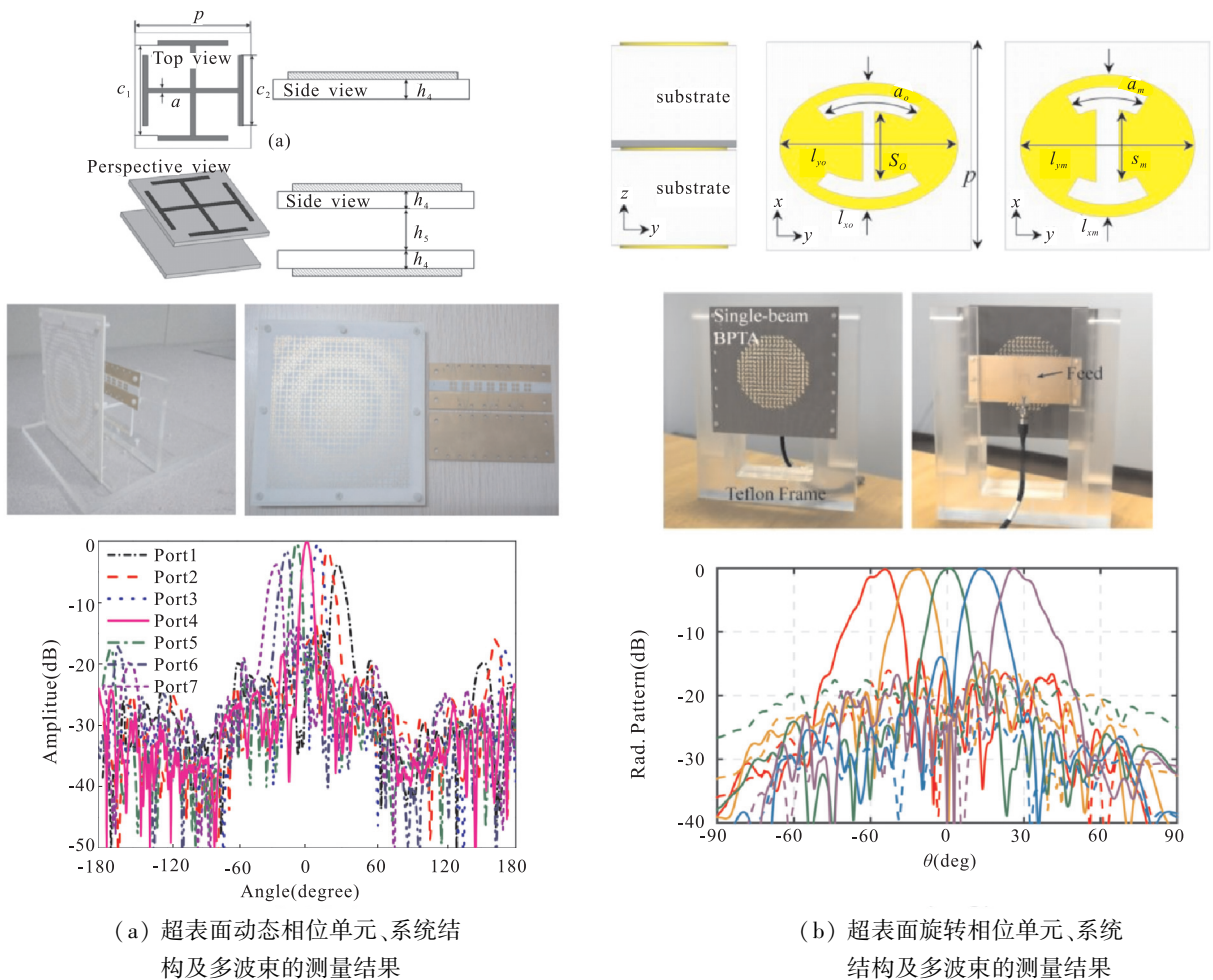


图4 多馈源多定向波束超表面

Fig. 4 Multi-feed multi-directional beam metasurface

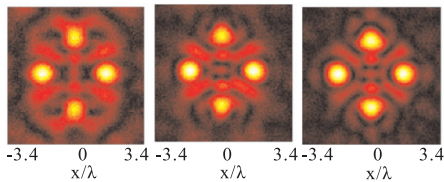
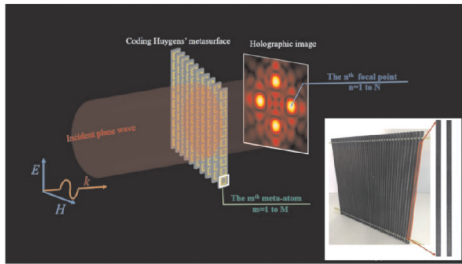
1.3 近场聚焦多波束超表面

使用远场高定向波束进行无线能量传输要求能量接收端具有足够大的接收面积,从而能够捕获相应波束的绝大多数能量,当能量接收设备距离发射端较近,但距离又远大于感应近场区时,近场聚焦多波束辐射器件将是较好的解决方案。近场聚焦指天线可以在菲涅尔区将电磁波汇聚到某一个或多个空间位置上,且具有一定的景深,也就是说,电磁波的功率密度在三个维度上都有较好的聚集效果。传统的近场聚焦天线可用天线阵列加相移馈电网络实现^[43],但是,当阵面较大时,馈电网络带来的损耗会抵消阵元数量增加带来的聚焦增益。此外,还可采用准光器件如抛物反射面^[44]、菲涅尔波带片^[45]等,它们的功分可在空间中几乎无损耗地完成,因此可获得较高的聚焦增益,但是仍存在体积大、非平面、

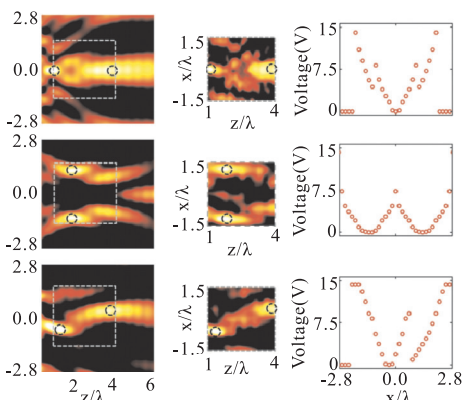
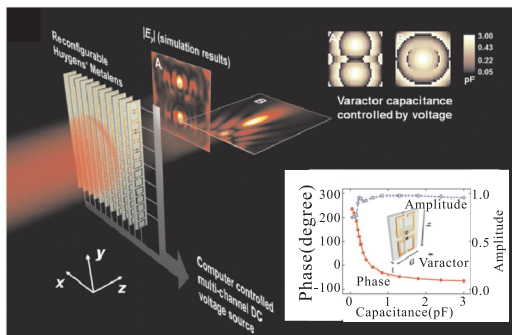
或口径效率低等缺点。

基于超表面结构,可以实现低剖面的近场聚焦天线,与远场高定向波束超表面天线类似,超表面的每个单元实现一定的反射相移或透射相移,在补偿馈源天线所发射的球面波相位的基础上,再增加一定的相移从而生成类似近场聚焦透镜出射面的相位分布,进而实现近场聚焦波束^[46-50]。如图5(a)所示,一个工作于微波波段的近场聚焦超表面可以实现单个甚至多个近场汇聚焦点,且每个汇聚点的三维位置均可以独立控制^[49]。如图5(b)所示,通过采用惠更斯超表面,即每个超表面单元都含有一个具有电谐振的偶极子和一个具有磁谐振的开口谐振环,可以实现阻抗匹配的相位调制,从而获得单焦点或多焦点近场聚焦^[50]。通过设计双极化超表面单元,还可以利用此类近场聚焦天线实现双极化近场

聚焦。值得注意的是, 此类均匀极化近场聚焦的焦点大小由波长所限制, 而若采用非均匀极化 (如径向极化) 近场聚焦, 则可以突破衍射极限, 将能量聚焦在一个具有亚波长尺寸的区域^[51]。



(a) 可以独立控制多焦点的近场聚焦超表面结构示意图及不同比特数相位下的全息图像



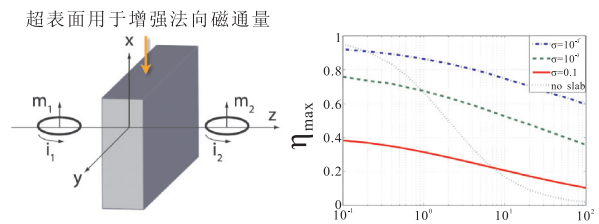
(b) 采用惠更斯表面的的阻抗匹配超表面结构示意图及仿真(左栏)、测试(中栏)得到的不同位置的焦点
图 5 几种近场聚焦的多波束超表面

Fig. 5 Multi-focal Metasurface for near-field focusing

2 超表面多波束天线在无线输能中的应用

鉴于超表面多波束天线的优势, 近年来, 除了在移动通信、卫星通信、电磁成像等领域发挥作用, 研究人员开始探索它们在无限能量传输领域的应用。此方向的应用研究主要从两个方面开展, 一个将磁谐振超表面用于感应近场区的无线能量传输^[52-55], 另一个则是将单波束/多波束超表面天线用于中远距无线能量传输^[56-58]。

在感应近场区的基于超表面的无线能量传输方面, 如图 6 所示, 通过将一个由电小尺寸磁谐振单元组成的超表面放置于发射线圈和接收线圈之间, 可以增强发射线圈与接收线圈之间的空间中的法向磁通量, 进而提高无线能量传输的效率^[52]。基于相似的原理, 此方法还可以被应用在低频超分辨成像、核磁共振信号增强中。最近, 利用凸半定松弛公式对非凸优化问题进行建模, 研究人员可以实现对此类复杂系统的严格优化^[56]。



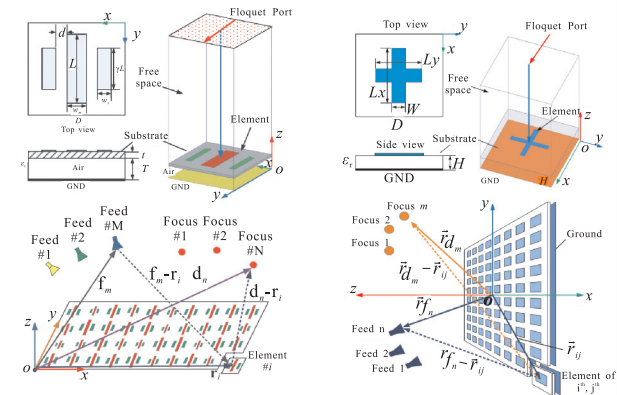
(a) 线能量传输示意图, 超表面置于发射和接收线圈之间以提高近场的法向磁通量
(b) 超表面的有无及磁损耗角正切对传输效率的影响

图 6 感应近场区无线能量传输示意图以及超表面对传输效率的影响

Fig. 6 schematic diagram of wireless power transfer in reactive near-field region and effect of metasurface on transmission efficiency

在基于电磁辐射的中远距无线能量传输方面, 研究人员设计了多种多波束超表面结构, 并将其融入无线能量传输场景进行测试。如图 7(a) 所示, 通过利用单极化多焦点反射式超表面, 可以将电磁波的能量汇聚到多个菲涅尔区的多个空间位置, 这里超表面单元由长度不同的三个耦合的偶极子组成, 可以在一个很宽的频带内实现线性度很高的反射相移^[56]。如图 7(b) 所示, 通过利用双极化近场聚焦反射超表面, 能够分别对两个正交线极化波独立产

生单个或多个位置可任意选取的焦点,从而对单个或多个接收端同时进行能量传输,且对于单个和多个焦点的情况,无线能量传输的效率均在65%以上^[57]。由于需要采用喇叭天线或其他平面天线作为馈源发射端,因此无线能量传输的发射总系统剖面面积较大,为了克服这个问题,研究人员设计了采用基于漏波辐射模式的全息超表面^[59],可以在大幅降低设备的剖面的同时实现在菲涅尔区的能量汇聚^[58]。



(a) 工作于菲涅尔区的单极化多焦点反射超表面的单元结构及多焦点示意图
 (b) 近场聚焦的双极化多焦点反射超表面的单元结构及多焦点示意图

图7 超表面在菲涅尔区无线能量传输中的应用

Fig. 7 Applications of metasurfaces in wireless power transfer at Fresnel region

3 结论与展望

无线能量传输的研究已有超过一百年的历史,尤其是在过去十多年里,磁感应式和电磁谐振耦合式能量传输取得了飞速发展,然而,基于电磁辐射的中远距无线能量传输仍然处在研究阶段。另一方面,近年来超表面这一新兴技术给通信、传感、以及成像带来了新的思路和解决方案,同时,其触角已开始伸入无线能量传输领域,特别是基于超表面的多波束天线的低成本、低剖面波束成形优势将在中、远距无线能量传输方面发挥作用。尽管如此,这个方向还有很多值得研究人员去探索和解决的难题,包括如何在不同功率下保持较稳定的传输效率、如何高效地对多个远场和近场聚焦波束进行动态调控、如何降低基于电磁辐射的无线能量传输系统对周边环境的电磁干扰等等问题。相信,随着一个个难关

的攻克,中远距无线能量传输走进人类的日常生活和生产将变为现实,从而进一步丰富人类运输能量的手段。

参考文献:

[1] N. Tesla. Apparatus for transmitting electrical energy. U. S. Patent 1 119 732[P], Dec. 1914.

[2] W. C. Brown. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, Volume 40: 1239-1250.

[3] W. C. Brown and E. E. Eves. Beamed microwave power transmission and its application to space [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, Volume 40: 1239-1250.

[4] J. O. McSpadden and J. C. Mankins. Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, Volume 3: 46-57.

[5] A. Costanzo, D. Masotti. Smart solutions in smart spaces [J]. IEEE Microwave Magazine, 2016, Volume 17: 30-45.

[6] B. Choi, J. Nho, H. Cha, T. Ahn, and S. Choi. Design and implementation of low-profile contactless battery charger using planar printed circuit board windings as energy transfer device[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, Volume 51: 140-147.

[7] J. Garnica, R. A. Chinga, J. Lin. Wireless Power Transmission: From Far Field to Near Field[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, Volume 101: 1321-1331.

[8] T. Arakawa, S. Goguri, J. V. Krogmeier, A. Kruger, D. J. Love, R. Mudumbai, and M. A. Swabey. Optimizing wireless power transfer from multiple transmit coils [J]. IEEE Access, 2018, Volume 6: 23828-23838.

[9] J. J. Casanova, Z. N. Low, J. Lin. A loosely coupled planar wireless power system for multiple receivers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, Volume 56: 3060-3068.

[10] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, Volume 317: 83-86.

[11] Z. Popovic. Cut the Cord: Low-Power Far-Field Wireless Powering [J]. IEEE Microwave Magazine, 2013, Volume 14: 55-62.

[12] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'

- Hara, J. Booth, D. R. Smith. Overview of the Theory and Applications of Metasurfaces: The Two-Dimensional Equivalents of Metamaterials [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2012, Volume 54: 10-35.
- [13] A. V. Kildishev, A. Boltasseva, A. M. Shalaev. Planar photonics with metasurfaces [J]. *Science*, 2013, Vol. 339, 1232009.
- [14] N. F. Yu, F. Capasso. Flat optics with designer metasurfaces[J]. *Nature materials*, 2014, Volume 13: 139-150.
- [15] S. L. Sun, Q. He, J. M. Hao, S. Y. Xiao, and L. Zhou. Electromagnetic metasurfaces: physics and applications[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2019, Volume 11: 380-479.
- [16] C. A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th Ed[M]. John Wiley & Sons, Inc. 31-33.
- [17] W. Hong et al. Multibeam Antenna Technologies for 5G Wireless Communications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, Volume 65: 6231-6249.
- [18] R. S. Malfajani, Z. Atlasbaf. Design and Implementation of a Dual-Band Single Layer Reflectarray in X and K Bands[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, Volume 62: 4425-4431.
- [19] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni. Broadband Reflectarray Antennas Using Double-Layer Subwavelength Patch Elements[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010, Volume 9: 1139-1142.
- [20] X. Gao, X. Han, W. P. Cao, H. O. Li, H. F. Ma, and T. J. Cui. Ultrawideband and High-Efficiency Linear Polarization Converter Based on Double V-Shaped Metasurface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, Volume 63: 3522-3530.
- [21] C. Pfeiffer, A. Grbic. Millimeter-Wave Transmitarrays for Wavefront and Polarization Control[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Volume 61: 4407-4417.
- [22] H. X. Xu, T. Cai, Y. Q. Zhuang, Q. Peng, G. M. Wang, J. G. Liang. Dual-Mode Transmissive Metasurface and Its Applications in Multibeam Transmitarray [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, Volume 65: 1797-1806.
- [23] T. Cai, G. M. Wang, X. L. Fu, J. G. Liang, Y. Q. Zhuang. High-Efficiency Metasurface With Polarization-Dependent Transmission and Reflection Properties for Both Reflectarray and Transmitarray[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Volume 66: 3219-3224.
- [24] F. Yang, Y. Kim, A. Yu, J. Huang, and A. Elsherbeni. A Single Layer Reflectarray Antenna for C/X/Ka Bands Applications [J]. *2007 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, 2007, 1058-1061.
- [25] A. Vallecchi, F. Capolino, A. G. Schuchinsky. 2-D Isotropic Effective Negative Refractive Index Metamaterial in Planar Technology [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, Volume: 19: 269-271.
- [26] K. Konstantinidis, A. P. Feresidis, and P. S. Hall. Broadband Sub-Wavelength Profile High-Gain Antennas Based on Multi-Layer Metasurfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, Volume 63: 423-427.
- [27] J. A. Encinar and J. A. Zornoza, Three-layer printed reflectarrays for contoured beam space applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, Volume 52: 1138-1148.
- [28] Z. H. Jiang, L. Kang, W. Hong, and D. H. Werner. Highly efficient broadband multiplexed millimeter-wave vortices from metasurface enabled transmit-arrays of sub-wavelength thickness [J]. *Phys. Rev. Appl*, 2019, volume 9.
- [29] N. F. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction [J]. *Science*, 2011, Volume 334: 333-337.
- [30] R. Florencio, J. A. Encinar, R. R. Boix, M. Barba, and G. Toso. Flat reflectarray that generates adjacent beams by discriminating in dual circular polarization [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Volume 67: 3733-3742.
- [31] Z. H. Jiang, T. Yue, and W. Hong. Low-profile and wideband dual-circularly-polarized reflect-arrays based on rotated metal backed dual-polarized aperture-coupled patch elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation (Early Access)*.
- [32] T. J. Cui et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light: Science & Applications*, 2014, Volume 3.
- [33] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni. Design and experiment of a single-feed quad-beam reflectarray antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, Volume 60: 1166-1171.

- [34] P. Nayeri, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni. Design of single-feed reflectarray antennas with asymmetric multiple beams using the particle swarm optimization method [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 2013, Volume 61: 4598-4605.
- [35] A. H. Abdelrahman, P. Nayeri, A. Z. Elsherbeni, and Fan Yang. Single-feed quad-beam transmitarray antenna design [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, Volume 64: 953-959.
- [36] H.-X. Xu, T. Cai, Y.-Q. Zhuang, Q. Peng, G.-M. Wang, and J.-G. Liang. Dual-mode transmissive metasurface and its applications in multibeam transmitarray [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, Volume 65: 1797-1806.
- [37] Z. H. Jiang, L. Kang, T. Yue, W. Hong, and D. H. Werner. Wideband transmit-arrays based on anisotropic impedance surfaces for circularly polarized single-feed multibeam generation in the Q-band [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Early Access).
- [38] Y. Zhou, S. Rondineau, D. Popovic, A. Sayeed, and Z. Popovic. Virtual channel space-time processing with dual-polarization discrete lens antenna arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2005, Volume 53: 2444-2455.
- [39] S. M. A. M. H. Abadi and N. Behdad. Design of wideband, FSS-based multibeam antennas using the effective medium approach [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, Volume: 62: 5557-5564.
- [40] M. Jiang, Z. N. Chen, Y. Zhang, W. Hong, and X. Xuan. Metamaterial based thin planar lens antenna for spatial beamforming and multibeam massive MIMO [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, Volume: 65: 464-472.
- [41] Y. Hou, L. Chang, Y. Li, Z. Zhang, and Z. Feng. Linear multibeam transmitarray based on the sliding aperture technique [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Volume 66: 3948-3958.
- [42] Z. H. Jiang, Y. Zhang, J. Xu, Y. R. Yu, W. Hong. Integrated Broadband Circularly-Polarized Multi-Beam Antennas Using Berry-Phase Transmit-Arrays for Ka-band Applications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (Early Access).
- [43] R. Z. Liu and K. Wu. Antenna Array for Amplitude and Phase Specified Near-Field Multifocus [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Volume: 67: 3140-3150.
- [44] R. C. Hansen. Focal region characteristics of focused array antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1985, Volume 33: 1328-1337.
- [45] S. Karimkashi and A. A. Kishk. Focusing properties of Fresnel zone plate lens antennas in the near-field region [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, Volume 59: 1481-1487.
- [46] L. Markley, G. V. Eleftheriades. Two-dimensional sub-wavelength focusing using a slotted meta-screen [J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, Volume 19: 137-139.
- [47] A. Grbic, L. Jiang, R. Merlin. Near-field plates: sub-diffraction focusing with patterned surfaces [J]. *Science*, 2008, Volume 320: 511-513.
- [48] A. Grbic, R. Merlin. Near-field focusing plates and their design [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, Volume 56: 3159-3165.
- [49] C. S. Guan, Z. C. Wang, X. M. Ding, K. Zhang, B. Ratni, S. N. Burokur, M. Jin, and Q. Wu. Coding Huygen' metasurface for enhanced quality holographic imaging [J]. *Optics Express*, 2019, Volume 27: 7108-7119.
- [50] K. Chen, Y. J. Feng et al. A Reconfigurable Active Huygens' Metalens [J]. *Advanced Material*, 2017, 1606422.
- [51] R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs. Sharper Focus for a Radially Polarized Light Beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, Volume 91, 233901.
- [52] Y. Urzhumov and D. R. Smith. Metamaterial-enhanced coupling between magnetic dipoles for efficient wireless power transfer [J]. *Phys. Rev.*, 2011, B, Condens. Matter, vol. 83, 205114.
- [53] M. J. Chabalko, J. Besnoff, and D. S. Ricketts. Magnetic field enhancement in wireless power with metamaterials and magnetic resonant couplers [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, Volume 15: 452-455.
- [54] B. Wang, W. Yezunis, and K. H. Teo. Wireless power transfer: Metamaterials and array of coupled resonators [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, Volume 101: 1359-1368.
- [55] H. D. Lang and C. D. Sarris. Optimization of Wireless Power Transfer Systems Enhanced by Passive Elements and Metasurfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, Volume 65: 5462-5474.

- [56] S. X. Yu, H. X. Liu, and L. Li. Design of Near-Field Focused Metasurface for High-Efficient Wireless Power Transfer With Multifocus Characteristics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, Volume 66: 3993-4002.
- [57] P. Zhang, L. Li, X. M. Zhang, H. X. Liu, Y. Shi. Design, Measurement and Analysis of Near-Field Focusing Reflective Metasurface for Dual-Polarization and Multi-Focus Wireless Power Transfer[J]. IEEE Access, 2019, Volume 7: 110387-110399.
- [58] V. R. Gowda, M. F. Imani, T. Sleasman, O. Yurduseven, D. R. Smith. Focusing Microwaves in the Fresnel Zone With a Cavity-Backed Holographic Metasurface[J]. IEEE Access, 2018, Volume 6: 12815-12824.
- [59] B. H. Fong, J. S. Colburn, J. J. Ottusch, J. L. Visher, D. F. Sievenpiper. Scalar and Tensor Holographic Artificial Impedance Surfacesp [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, Volume 58: 3212-3221.