

文章编号: 2095-4980(2023)04-0498-09

应用于微波无线能量传输系统的发射波束技术

卢 萍, 黄卡玛*, 范银玲, 刘志伟, 侯 静

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 概述了微波无线能量传输系统的研究现状及其基本原理, 从可提高波束能量的一些特殊口径场以及先进的天线技术角度, 分别按 Whisper 波束、超增益天线、平顶波束、聚焦天线技术、非衍射天线进行介绍。最后对微波能量传输系统中发射技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 微波无线能量传输系统; Whisper 波束; 超增益天线; 平顶波束; 聚焦天线技术; 非衍射天线

中图分类号: TN915

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023010

Review of transmit beam technology for microwave wireless energy transmission system

LU Ping, HUANG Kama*, FAN Yinling, LIU Zhiwei, HOU Jing

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: The research status of microwave wireless energy transmission system and its basic principles are outlined. Some advanced antenna technologies, such as Whisper beam, super gain, flat-top beam, focused beam, non-diffractive beam are introduced, which can improve the special aperture field for high transmission efficiency. Finally, the future development trends of the transmitter beam technology in microwave energy transmission system are prospected.

Keywords: microwave wireless energy transmission system; Whisper beam; super gain antenna; flat-top beam; focused antenna technology; non-diffractive antenna

随着社会的发展与进步, 现代化建设的不断深入, 能源需求不断上涨, 如何获取清洁、可持续、可再生能源是当前人类面对的共同问题。除了对太阳能的开发利用, 随着微波技术的不断进步, 其作为能量载体的作用也日益受到人们的重视, 并逐渐发展成为独立的研究方向, 即微波无线能量传输技术。微波无线能量传输是利用微波作为能量的载体, 将电能从发电装置端无线传输到接收端并加以转化的能量传输方式^[1-5]。天线是无线能量传输的关键元件, 负责能量的发送和接收。为提高微波能量传输效率, 早期研究人员就讨论了 2 个口径面天线之间的最大效率传输条件。研究发现, 为使接收天线获得最大的射频功率, 发射和接收天线需要满足特殊的口径场分布。近年来, 一些特殊口径场以及先进的天线技术被提出, 用于微波无线能量传输领域, 如, Whisper 波束、超增益天线、平顶波束、聚焦天线技术、非衍射天线等, 可提高波束能量。

1 Whisper 波束

Whisper 波束(美国专利: US2020195057A1)是由 2 个或多个相干高斯光束沿传播轴传播, 形成一个焦点。在形成焦点后, 以自动离焦(Abruptly Auto Defocus, AADF)模式分散光束(波束), 然后分散的高斯光束过渡到自动对焦(Abruptly Auto-Focus, AAF)模式, 形成第二焦点, 如图 1 所示^[6]。在自动离焦区域, 功率小, 不会对人员的活动造成威胁; 而在接收端, 在第二聚焦点上, 可接

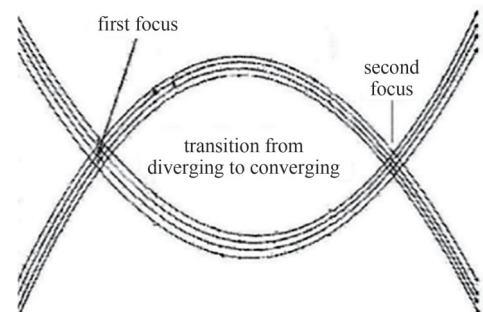


Fig.1 Whisper beam
图 1 Whisper 波束

收稿日期: 2023-01-09; 修回日期: 2023-02-22

*通信作者: 黄卡玛 email: kmhuang@scu.edu.cn

收能量。通过自动离焦和自动对焦模型,可实现在目标位置处的能量传输,且不影响人员活动。Whisper 天线理论上可行,但应用到工程中目前尚存在一些不足:a) 为了实现 Whisper 波束,天线阵列由上百个或百万个天线单元构成,且天线单元都需要调幅调相,也可以采用稀疏阵列的方法,但需要的天线单元仍然很多。b) 虽然理论上可用于射频,但低频天线口径相当大;c) 天线阵列放置在 20 倍波长内的另一个焦点位置,意味着 2 个焦点的位置为 20 倍波长以内,Whisper 波束传播距离不远。

2 聚焦天线

在微波无线能量传输中,为获得发射天线与接收天线之间最大的传输效率,通常使用近场聚焦天线^[7-8]将电磁能量聚焦到天线近场区的小区域面积内。近场聚焦天线的基本思想是控制天线孔径上辐射源(阵列元件电流或等效表面电流)的相位,使它们的辐射场在指定的焦点处同相叠加。单个焦点的近场聚焦天线通常基于射线光学模型设计。

目前天线实现聚焦的方法有以下几类:第一类是透镜天线。在天线前放置一块透镜,该透镜表面利用费马原理进行设计,通过对透镜材料、口径大小以及厚度的调节,改变其折射率,使天线聚焦。电子科技大学 Shilin LIU 等^[9]设计了一种工作在 Ka 波段的无线能量传输的近场聚焦透镜天线,该透镜采用低损耗树脂材料通过 3D 打印技术进行制作,如图 2 所示。与相同口径的高增益透镜天线相比,该透镜天线的能量更聚焦,发射效率提高了 9.7%;且在一定发射效率下,使用该透镜天线可减小接收面积。Ricardo Goncalves 团队^[10]设计了一种工作在 Ku 波段的聚焦天线,专为无线能量传输系统而设计,它由一个简单的半球形介质透镜构成,如图 3 所示,并采用微带线进行馈电,介质透镜与微带的结合提高了天线增益并更加聚焦,该天线带宽范围在 12.7~13.15 GHz,最大增益达到 18.1 dBi。

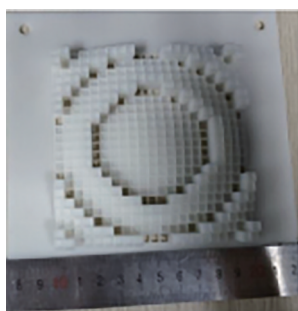


Fig.2 Photograph of the lens fabricated by 3D printing^[9]
图2 3D 打印技术制作的透镜实物图^[9]

第二类是超表面聚焦天线。将超表面运用到透镜上,作为透射超表面阵列,实现波束聚焦。Haipeng LI 等^[11]提出一种基于超表面的高增益聚焦透镜天线,如图 4 所示,采用多层的相位梯度超表面,将电磁波高效地聚焦于一点,不仅提高了传输效率和增益,还减小了波束宽度。另一种方式是将超表面引入到反射阵列中,调整不同单元的电磁参数实现聚焦。西安电子科技大学李龙团队^[12]提出一种用于无线能量传输的近场聚焦的反射超表面阵列天线,实现了多焦点和高效率的能量传输。

第三类是采用相控阵技术。通过控制阵列中天线的馈电幅度与相位,以及尺寸参数实现聚焦。Romain Siragusa 等^[13]提出一种工作在 5.8 GHz,焦距可调的聚焦圆形相控阵列天线,其馈电网络简单,可以在 10λ 范围内调节焦点,在相同的口径条件下,波长越小,聚焦效果越好。Vctor Farm-Guoo Tseng 团队^[14]使用相控阵将功率聚焦到任意位置上的接收器,提高功率传输效率。如图 5 所示,相控阵由 37 个单元组成,与具有相同峰值效率距离的单个大型的换能器相比,效率提高了 2.6 倍。通过调整焦距,效率也可以在最远 9 cm 的距离内保持相对恒定。在天线设计中采用一些优化算法,可以实现具有特定性质的聚焦波束。Álvarez 等提出了一种基于迭代 Levenberg-Marquardt 算法的优化方法,实现了最小旁瓣水平^[15]。Chou 等^[16]提出了一种平面微带阵列的近场聚焦综合技术,通过最速下降法确定阵列单元的激励相位,实现近场聚焦。R G Ayestarán 等采用支持向量回归模型,实现了多焦点的近场聚焦天线阵列设计^[17]。

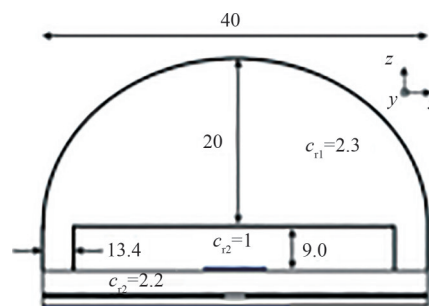


Fig.3 Schematic of hemispherical lens antenna
图3 半球形透镜天线示意图

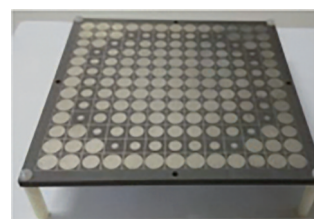


Fig.4 Prototype of proposed Phase-Gradient Metasurface(PGMS) lens antenna
图4 多层相位梯度超表面透镜天线实物图

目前，近场聚焦已成功实现，但这些透镜近场聚焦天线都存在传输距离与天线口径比拟，且焦点位置固定，不易调控。

3 超增益天线

超增益天线是指增益大于相同尺寸等辐同相馈电的天线增益的一类天线，因其增益高于传统天线，且尺寸小，非常适合用于无线能量传输。

早期超增益天线由于导体损耗比较大，导致天线效率低，严格意义来说只能算是超方向性天线。J M Lugo 等^[18]提出了一种结构紧凑的由领结型单极子组成的超方向性天线阵列，天线阵列结构如图 6 所示。该阵列由与匹配网络和解耦网络组成的功率分配器对天线进行馈电，实现超方向性。S M Mazinani 等^[19]采用平板单极子天线阵列实现超方向性，如图 7 所示。该天线阵列使用了功分器和移相器对天线进行精确馈电，使天线阵列在宽带范围实现超方向性。这些超方向性天线都需要对单元进行精确馈电。

后期有人提出通过寄生馈电方式也可以实现天线的超方向性。Abdullah Haskou 等^[20-22]采用 Yaghjian 方法计算出天线阵列的有源阻抗和寄生单元所需寄生阻抗值，通过在寄生单元处连接对应阻抗值的电容或电感，天线可实现超方向性，与每个天线单元都馈电的阵列天线性能一致，如图 8 所示。Antonio Clemente 等^[23]提出了一种基于球面波展开的特殊合成方法，提取了各寄生单元相关的最佳阻抗负载，设计了一种基于折叠弯曲偶极子单元的四元超定向阵列，如图 9 所示，该阵列由 1 个有源元件和 3 个寄生元件组成。Saber Dakhli 等^[24-25]提出了一种无需电抗元件直接寄生的超方向性天线阵列，如图 10 所示。Oleksiy S Kim 等^[26]提出了一种无需电抗直接寄生的磁偶极子二元超方向性天线阵列，如图 11 所示，该天线立于地面之上，以八木的方式排列以达到更高的方向性。

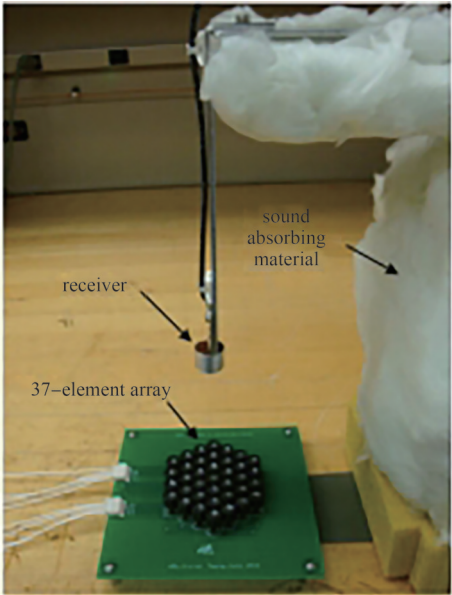


Fig.5 Phased array and experiment setup
图 5 相控阵列及其实验装置

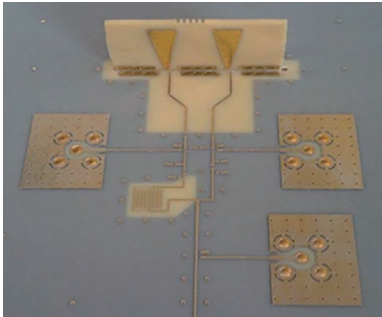


Fig.6 Antenna array with bow-tie monopoles
图 6 由领结型单极子组成的天线阵列

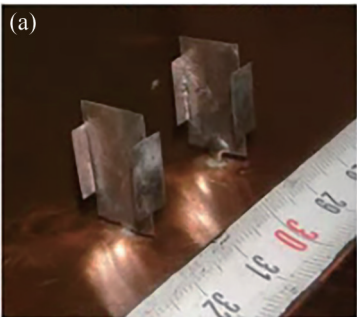
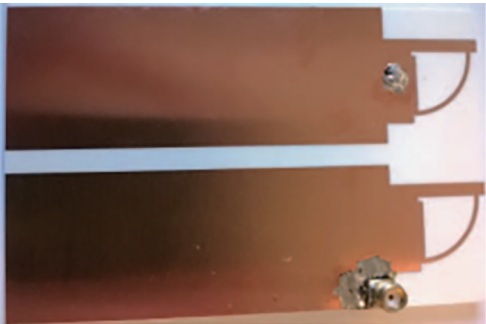
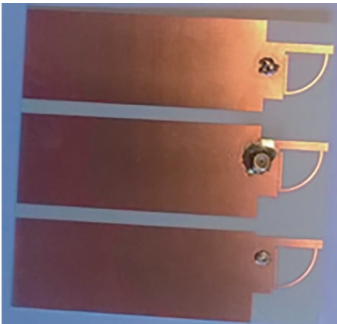


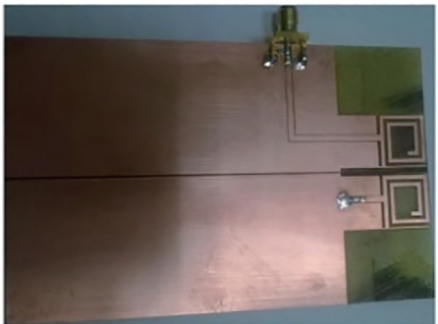
Fig.7 Planar monopole antenna array (a) antenna array and (b) measurement setup
图 7 由平板单极子组成的(a) 天线阵列；(b)测试结构图



(a) two-element array



(b) three-element array



(c) folded monopole array

Fig.8 Array with resonant ring structure
图 8 谐振环组成的天线阵列

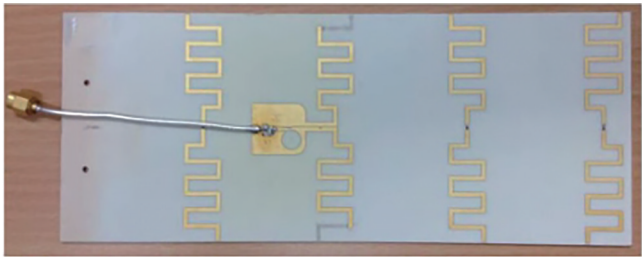


Fig.9 Photograph of the realized four-element parasitic antenna array based on the folded meandered dipole element
图9 四元弯曲单偶极子天线阵列

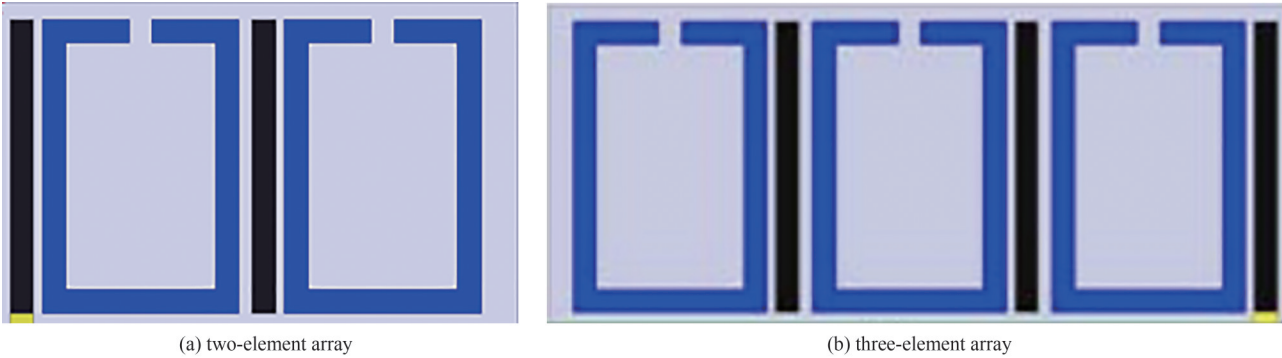


Fig.10 Resonant ring structure
图10 谐振环型阵列



Fig.11 Resonant ring antenna array on a metal ground plane
图11 立于金属地面上的谐振环天线阵列

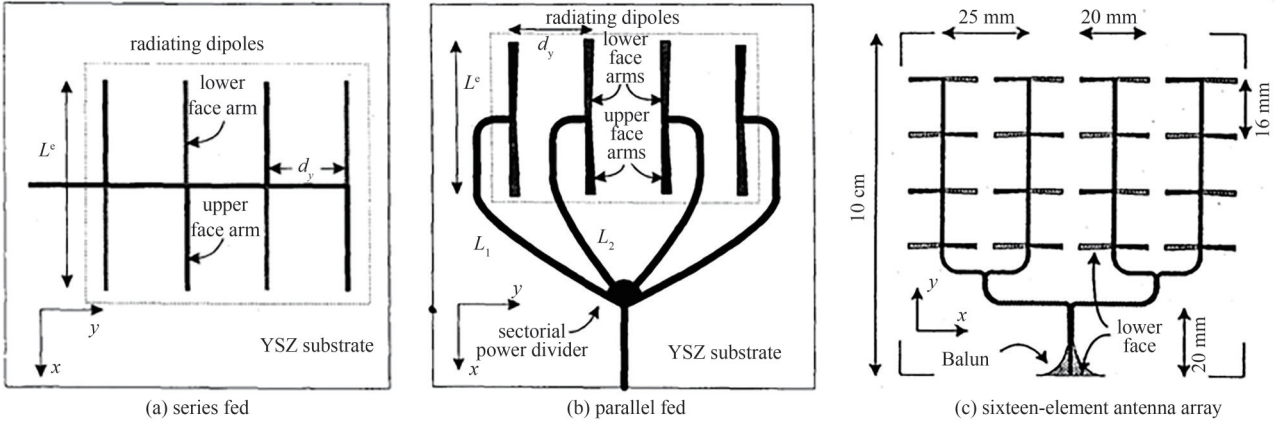


Fig.12 Four-element array
图12 四元天线阵列

目前已成功实现了天线的超方向性，但超方向性天线阵元上具有非常大的电流，导致天线的辐射效率非常低，增益极低。随着超导材料的发展，超导超增益天线也逐渐发展起来。超导材料拥有在低于其临界温度时的

零电阻特性,将超导材料用于天线上,可大大提高天线的效率。现在已可以制造出工作于液氮温度的高温超导材料,这样可使用液氮提供天线工作的低温环境,解决了之前使用液氮来实现天线工作的环境温度时价格昂贵的问题。

L P Ivriissimtzis 等^[27-28]采用厚膜高温超导材料 YBCO 在 YZS 基板上制作成四元、十六元紧凑印刷偶极子超导超增益天线阵列。该阵列具有集成馈电网络和巴伦,也由高温超导体制成。超导阵列的增益明显高于类似的过冷后由银制成的天线阵列。但这些超增益天线在工程上一直没有得到广泛应用,主要是因为其鲁棒性极差。

4 平顶波束

在无线能量传输中,整流天线二极管的整流效率对接收功率十分敏感,而聚焦波束、高斯波束等常规波束在接收天线口径上功率分布不均匀,导致整流电路效率变差。平顶波束能够保证接收端功率密度的均匀性,有利于从整流天线中提取最大输出功率和功率转换效率,对提高二极管整流效率以及简化整流电路的设计具有重要意义^[29]。如图 13 所示,对于一般的高增益发射天线,其在接收天线处的功率密度总是呈锥形递减分布,在中心区域的功率密度较大,在边缘区域的功率密度较小,导致整流天线的整流效率极低。平顶波束天线通常要求在一定的覆盖范围内提供平顶辐射方向图,超过该辐射范围,功率强度迅速衰减到一个非常低的水平,以避免与其他同时工作的同频率天线产生干扰。然而,从已有的平顶波束研究发现,波束宽度过宽会带来微波无线能量传输效率过低的问题^[30]。

陈诚等^[31]基于无线能量传输背景,从理论上研究了实现平顶波束的必要条件,并给出了平顶波束的解与其波束宽度的对应关系,证明了平顶波束宽度与最大增益下 3 dB 角的最小比值为 2.4。在平顶波束天线的设计中,可以通过各种优化方法和近似算法来确定天线阵列的幅值和相位分布。对于等间距天线阵列,通过傅里叶变换方法和 Schelkunoff 方法可以在不考虑旁瓣电平的情况下产生平顶波束^[32-33]。Xiao Cai 等提出了一种远场和近场平顶辐射图阵列天线的优化设计方法,该方法将平顶辐射图的合成描述为具有相等约束的二次约束二次规划问题^[34]。G K Mahanti 等在文献[35]中采用了粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO),根据目标需求,通过随机搜索求解了环形天线阵列实现平顶波束所需的馈电系数。多平顶波束天线可用于同时覆盖多个区域的场景,C Wang 等采用差分进化算法提出了一个 1×16 非均匀阵列天线,实现了具有 4 个平顶波束的阵列天线^[36]。但研究发现,平顶波束的波束宽度很宽,会造成能量浪费,波束利用率低,且平顶波束天线效率很低。

5 非衍射波束

非衍射波束,即波束在传输过程中不发生衍射现象,可被看作是传播常数以倾斜方向传播的平面波叠加而成,具有无限能量,如图 14 所示。

Pierre Lemaitre-Auger 等提出了用于伪贝塞尔波束生成的平面天线阵列的概念,并通过使用亚采样的阵元分布,减少天线单元个数^[37]。2013 年,C Caloz 小组从全息理论出发,采用二维天线阵列(尺寸为 $60\lambda_0 \times 60\lambda_0$,天线单元之间相距约 $4\lambda_0$, λ_0 为空间中的波长),通过控制天线单元电流幅度和相位,实现了 50 GHz 下的 Bessel 非衍射波束,其非衍射距离可达 $300\lambda_0$,如图 15 所示^[38]。同年,Y Z Yu 等基于天线方向综合理论,采用均匀平面天线阵列,在 THz 下实现了 Bessel-Gauss 波束^[39]。

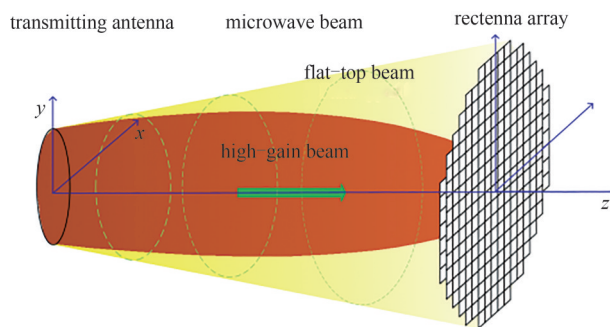


Fig.13 Comparison of flat-top beams and high-gain beams for microwave wireless power transmission

图 13 平顶波束和高增益波束的微波无线能量传输模型对比

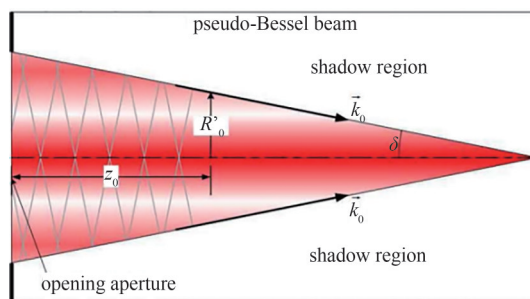


Fig.14 Non-diffracted beam

图 14 非衍射波束沿轴向的辐射强度分布

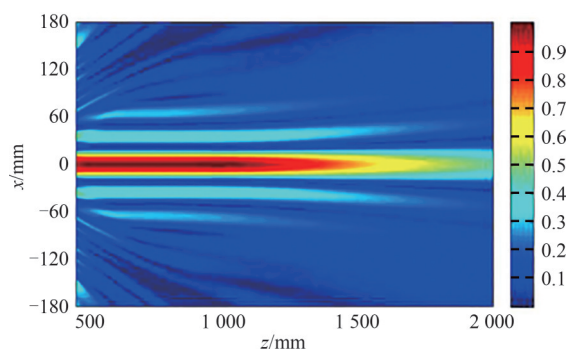


Fig.15 Field intensity distribution of Bessel beam generated by the 367-element antenna array

图 15 367 单元的天线阵列产生的贝塞尔波束沿轴向的场强分布

近年来,超材料具有调控电磁波特性的能力,已成为研究热点之一^[40-42]。为避免非衍射二维天线阵列中复杂的馈电网络,近年来,T J Cui 团队采用梯度折射超材料透镜,利用其电磁调控特性,在宽频段内实现了 Bessel 非衍射波束^[43]。二维形式的超材料,即超表面结构,具有结构简单和易加工的优点,得到了广泛关注。2014 年,该团队采用 2 个超表面透镜天线共同作用,将 2 组不同传播方向的平面波成功地转换为 Bessel 非衍射波束,如图 16 所示^[44]。

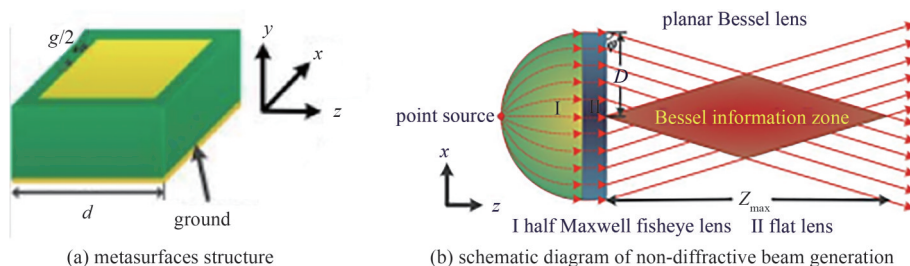


Fig.16 Non-diffractive metasurfaces lens

图 16 超表面透镜非衍射天线

为实现非衍射波束调控,Y J Cheng 等通过在不同区域里排列不同的相移单元,实现宽带 Bessel 非衍射波束,且非衍射距离随频率基本保持不变^[45]。B Cheng 等提出了采用人工导纳调制的超表面结构实现波束方向调控的设计方案。通过改变频率,超表面结构能够产生不同相位差的电磁波,实现非衍射波束方向可调,如图 17 所示^[46]。2014 年,T J Cui 团队提出了一种“编码超表面”,这种超表面只需设计单元的编码次序,即可实现电磁波的调控^[47-50]。通过改变谐振环的开角和朝向,超编码表面单元可产生 $0 \sim 2\pi$ 的相位差。再对超表面单元编排不同的编码序列,实现传输型编码超表面结构,产生垂直和倾斜的 Bessel 非衍射波束,如图 18 所示^[51]。

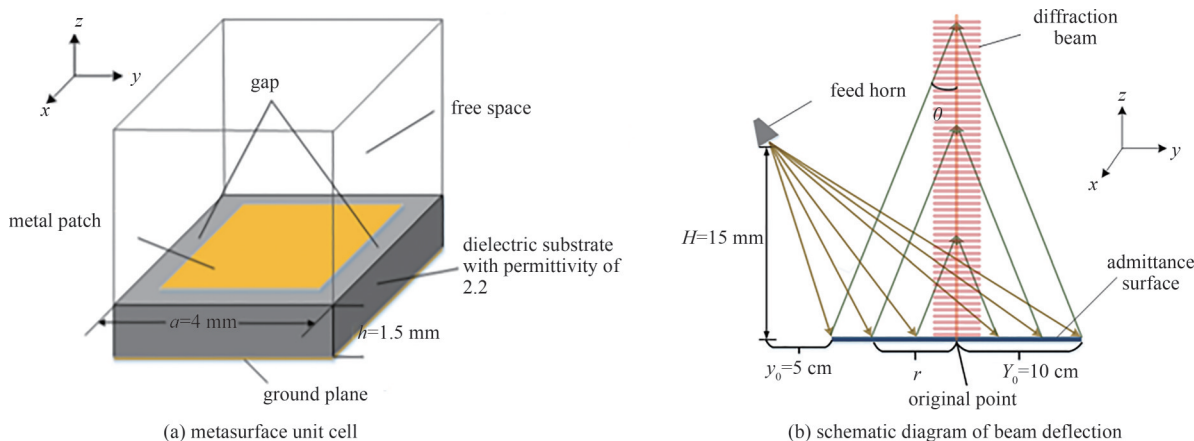


Fig.17 Non-diffractive beam deflection for metasurface

图 17 超表面非衍射波束调控

虽然在非衍射距离内,目标可以任意移动,弥补了聚焦天线不易调控的缺点,但这些非衍射天线在实际工程中仍未得到广泛应用,主要有以下几方面的因素:a) 非衍射波束的传输距离与天线口径比拟。理想的非衍射波束可以传输无穷远,但需要无限大的口径。对于有限大口径发射的非衍射波束具有最大非衍射传输距离,一

般与天线口径相比拟。b) 非衍射波束旁瓣高, 波束能量利用率低等。

综上所述, 这些研究传输距离与口径大小成正比相关。对于远距离无线能量传输, 不利于工程实践化。并且, 这些特殊分布仅考虑了发射天线或接收天线的口径场分布, 而没有考虑实际天线情况和 2 个天线之间的互耦关系。此外, 在微波无线能量传输系统中, 接收天线后面都接有二极管负载, 因此考虑二极管非线性特性的发射/接收天线间的最大效率传输条件必须加以改进。

6 结论

综上所述, 天线在无线能量传输系统中至关重要。其中, 无线能量传输距离与天线口径大小相关。天线口径越大, 其传输距离越远。然而, 在实际工程应用中, 远距离无线能量传输系统需要大口径天线来实现, 但口径大的天线具有造价高、馈电网络复杂等缺点, 不利于工程实践化。此外, 这些特殊场分布只考虑了发射天线或接收天线的口径场分布, 没有考虑实际天线情况和两个天线之间的互耦关系。在实际应用中, 天线之间的互耦效应也会对无线能量传输产生不良影响。因此, 在设计和优化无线能量传输系统时, 需要考虑到天线的实际情况和天线之间的相互作用。另外, 在微波无线能量传输系统中, 接收天线后面往往接有二极管负载。这意味着需要考虑二极管的非线性特性对于发射和接收天线间的最大效率传输条件的影响。具体而言, 需要优化发射和接收天线之间的匹配条件, 以确保二极管负载的最大效率。这样可以提高能量传输的效率, 同时减少能量损耗和无线电波的干扰。

在未来, 随着无线能量传输技术的不断发展和应用, 这些问题将得到更好的解决。同时也期待着更多的研究和实践, 以不断推进无线能量传输技术的发展和应用。例如可以通过改进天线设计和优化系统部署, 以提高无线能量传输的效率和可靠性; 通过优化收发天线阵列设计来实现更好的功率和方向性控制; 并且需要开展更多关于远距离无线能量传输的试验, 以推动其工程实践; 同时还可以探索无线能量传输新技术和新的应用场景, 以实现更广泛、更高效、更可靠的远距离无线能量传输。

参考文献:

- [1] BROWN W C, EVES E E. Beamed microwave power transmission and its application to space[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1992,40(6):1239–1250.
- [2] STRASSNER B H, CHANG K. Microwave power transmission: historical milestones and system components[J]. Proceedings of the IEEE, 2013,101(6):1379–1396.
- [3] HSIEH L H, STRASSNER B H, KOKEL S J, et al. Development of a retrodirective wireless microwave power transmission system[C]// Antennas & Propagation Society International Symposium. Columbus, OH, USA: IEEE, 2003:393–396.
- [4] JOURNALS I, REDDY M V, HEMANTH K S, et al. Microwave power transmission—a next generation power transmission system[J]. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2013(5):24–28.
- [5] BROWN W C. The history of wireless power transmission[J]. Solar Energy, 1996,56(1):3–21.
- [6] GREASON J. Non-Gaussian beams for long-distance wireless power transmission: USA: US20200195057A1[P]. 2020.
- [7] NEPA P, BUFFI A. Near-field-focused microwave antennas: near-field shaping and implementation[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2017,59(3):42–53.
- [8] BUFFI A, NEPA P, MANARA G. Design criteria for near-field-focused planar arrays[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2012,54(1):40–50.
- [9] LIU S L, LIN X Q, JIA X C, et al. A near field focused lens antenna for wireless power transmission systems[C]// IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation(APCAP). Auckland, New Zealand: IEEE, 2018:313–315.
- [10] GONCALVES R, PINHO P, CARVALHO N B. 3D printed lens antenna for wireless power transfer at Ku-band[C]// The 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Paris, France: IEEE, 2017:773–775.
- [11] LI H, WANG G, XU H X, et al. X-band phase-gradient metasurface for high-gain lens antenna application[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(11):5144–5149.

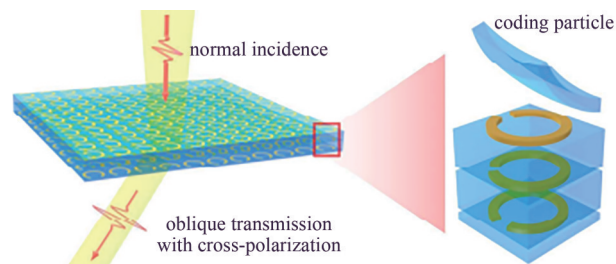


Fig.18 Coding metasurface

图 18 编码单元结构

- [12] ZHANG P, LI L, ZHANG X, et al. Design, measurement and analysis of near-field focusing reflective metasurface for dual-polarization and multi-focus wireless power transfer[J]. IEEE Access, 2019(7):110387–110399.
- [13] SIRAGUSA R, LEMAITRE-AUGER P, TEDJINI S. Tunable near-field focused circular phase-array antenna for 5.8 GHz RFID applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011(10):33–36.
- [14] TSENG V F G, BEDAIR S S, LAZARUS N. Phased array focusing for acoustic wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 65(1):39–49.
- [15] JALVAREZ J, AYEATARAN R G, LAS-HERAS F. Design of antenna arrays for near-field focusing requirements using optimization[J]. Electronics Letters, 2012, 48(21):1323–1325.
- [16] CHOU H T, HUNG K L, CHOU H H. Design of periodic antenna arrays with the excitation phases synthesized for optimum near-field patterns via steepest descent method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(11):4342–4345.
- [17] AYESTARÁN R G, LAS-HERAS F. Near-field multi-focused arrays using support vector regression[C]// The 14th European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020:1–5.
- [18] LUGO J M, GOES J D A, LOUZIR A, et al. Design, optimization and characterization of a superdirective antenna array[C]// The 7th European Conference on Antennas and Propagation. Gothenburg: IEEE, 2013:3736–3739.
- [19] MAZINANI S M, HASSANI H R. Superdirective wideband array of planar monopole antenna with loading plates[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9):978–981.
- [20] HASKOU A, SHARAIHA A, COLLARDEY S. Design of small parasitic loaded superdirective end-fire antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12):5456–5464.
- [21] HASKOU A, COLLARDEY S, SHARAIHA A. Small array design using parasitic superdirective antennas[C]// The 10th European Conference on Antennas and Propagation. Davos, Switzerland: IEEE, 2016:1–4.
- [22] HASKOU A, SHARAIHA A, COLLARDEY S. Integrating superdirective electrically small antenna arrays in PCBs[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016(15):24–27.
- [23] CLEMENTE A, JOUANLANNE C, DELAVEAUD C. Analysis and design of a four-element superdirective compact dipole antenna array[C]// The 11th European Conference on Antennas and Propagation. Paris, France: IEEE, 2017:2700–2704.
- [24] DAKHLI S, RMILI H, FLOCH J, et al. A novel compact and superdirective two elements antenna array[C]// Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC). Loughborough, UK: IEEE, 2016:1–5.
- [25] DAKHLI S, LADHAR L, FLOCH J M, et al. Design of a novel compact and superdirective two and three elements antenna array[C]// The 4th International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies. Hammamet, Tunisia: IEEE, 2020:225–228.
- [26] KIM O S, PIVNENKO S, BREINBJERG O. Superdirective magnetic dipole array as a first-order probe for spherical near-field antenna measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(10):4670–4676.
- [27] IVRISIMTZIS I P, LANCASTER M J, ALFORD N M. Supergain printed arrays of closely spaced dipoles made of thick film high-Tc superconductors[J]. Microwaves Antennas & Propagation IEE Proceedings, 1995, 142(1):26–34.
- [28] IVRISIMTZIS L P, LANCASTER M J, ALFORD N M. A high gain YBCO antenna array with integrated feed and balun[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2):3199–3202.
- [29] TAKABAYASHI N, SHINOHARA N, MITANI T. Study on power conversion efficiency of rectenna array with deformed flat-top beam for microwave power transmission[C]// 2022 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Denver, CO, USA: IEEE, 2022:352–355.
- [30] ORCHARD H J, ELLIOTT R S, STERN G J. Optimizing the synthesis of shaped beam antenna patterns[J]. IEE Proceedings H: Microwaves Antennas & Propagation, 1985, 132(1):63–68.
- [31] 陈诚, 黄卡玛. 无线能量传输中平顶波束的分析应用[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5):7. (CHEN Cheng, HUANG Kama, Analysis of flat-top beams for wireless power transmission[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2018, 40(5):7.)
- [32] WOODWARD P M, LAWSON J D. The theoretical precision with which an arbitrary radiation-pattern may be obtained from a source of finite size[J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers—Part III: Radio Commun., 1948, 95(93):363–370.
- [33] SCHELKUNOFF S A. A mathematical theory of linear arrays[J]. Bell System Technical Journal, 1944, 22(1):80–107.
- [34] XIAO Cai, WEN Geyi. An optimization method for the synthesis of flat-top radiation patterns in the near- and far-field regions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2):980–987.
- [35] MAHANTI G K, SINHAMAHAPATRA T K, AHMED A, et al. Synthesis of flat-top beam pattern with a multiple concentric circular ring array antenna[C]// 2008 IEEE Region 10 and the Third International Conference on Industrial and Information Systems. Kharagpur, India: IEEE, 2008:729–730.

- [36] WANG C,ZHENG S. A compact multiple flat-topped beams antenna based on Butler matrix[C]// 2022 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Sanshui,Foshan,China:IEEE, 2022:1–5.
- [37] LEMAITRE–AUGER P,ABIELMONA S,CALUZ C. Generation of Bessel beams by two-dimensional antenna arrays using sub-sampled distributions[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013,61(4):1838–1849.
- [38] AUGER P L,ABIELMONA S,CALUZ C. Generation of Bessel beams by two-dimensional antenna arrays using sub-sampled distributions[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2013,61(4):1838–1849.
- [39] YU Y Z,LI Y F,WANG Y Y. Production of Bessel–Gauss beams at THz by use of UPA[C]// 2013 Proceeding of the International Symposium on Antennas and Propagation. Nanjing,China:Southeast University, 2013(2):1082–1085.
- [40] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of sigma and mu[J]. Physics–Uspekhi, 1968,10(4):509.
- [41] SMITH D R,PADILLA W J,VIER D C,et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 1999,84(11):2075–2084.
- [42] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000,85(18):3966–3969.
- [43] QI M Q,TANG W X,CUI T J. A broadband Bessel beam launcher using metamaterial lens[J]. Scientific Reports, 2015,5(1): 11732-1–11.
- [44] LI Y B,CAI B G,WAN X,et al. Diffraction-free surface waves by metasurfaces[J]. Optics Letters, 2014,39(20):5888–5891.
- [45] ZHONG Y C,CHENG Y J. Ka-band wideband large depth-of-field beam generation through a phase shifting surface antenna[J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2016,64(12):5038–5045.
- [46] CHENG B,LIU D W,WU J W,et al. Frequency scanning non-diffraction beam by metasurface[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(3):031108-1–10.
- [47] CUI T J,QI M Q,WAN X,et al. Coding metamaterials,digital metamaterials and programmable metamaterials[J]. Light:Science and Applied, 2014,3(10):218.
- [48] LIU X,GAO J,XU L,et al. A coding diffuse metasurface for RCS reduction[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017(16):724–727.
- [49] XIE B Y,TANG K,CHENG H,et al. Coding acoustic metasurfaces[J]. Advanced Materials, 2016(29):1603507-1–11.
- [50] MOCCIA M,LIU S,WU R Y,et al. Coding metasurfaces for diffuse scattering: scaling laws,bounds,and suboptimal design[J]. Advanced Optical Materials, 2017(5):1700455-1–11.
- [51] LIU S,NOOR A,DU L L,et al. Anomalous refraction and nondiffractive Bessel-beam generation of terahertz waves through transmission-type coding metasurfaces[J]. ACS Photonics, 2016,3(10):1968–1977.

作者简介:

卢 萍(1990–), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微波无线能量系统研究以及新型天线设计技术.
email:pinglu90@scu.edu.cn.

黄卡玛(1964–), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电磁场微波工程、微波化学.

范银玲(1997–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

刘志伟(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.

侯 静(1983–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁场与微波技术.