



基于新型超材料结构的高效率发射天线技术研究综述

摘要

近年来,超材料打破了传统材料或结构的物理极限,为高效率发射天线的发展开辟了崭新的研究空间,获得了愈来愈广泛的关注.首先介绍了超材料的理论和结构研究概况,然后针对几种新型超材料技术在提高平面天线单元效率的研究工作进行了详细介绍和分析,包括非周期超材料技术、超材料作为新型辐射元或低剖面反射板等方面.最后,针对无线能量收集系统对高效率天线阵列的需求,介绍了高次模激励技术和新型低损耗传输线技术,以此降低阵列馈电网络的损耗,从而提高系统的整体效率.

关键词

超材料;低损耗;非周期;高次模;效率

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2016-11-27

资助项目 国家自然科学基金青年基金项目(61601224);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20160844)

作者简介

杨琬琛,女,博士,讲师,主要研究方向为微波/毫米波天线、新型超材料天线等.

yangwanchen@126.com

¹ 南京理工大学 电子工程与光电技术学院,南京,210094

0 引言

天线作为无线通信系统中不可或缺的一个组成部分,主要功能除了用来辐射和接收电磁波以外,也是一个好的能量转换器,能很好地完成高频电流或导波与同频率无线电波的转换.天线辐射效率用来表征高频能量与无线电波能量之间的转换程度,是衡量系统性能的一个重要指标.尤其在微波能量收集应用中,探究高效率的发射天线技术受到越来越广泛的关注.

平面天线因具有较低的剖面、易于系统集成等优点,被广泛应用于各种无线通信系统中.其中,微带天线以其结构简单、体积小、成本低等特性受到广泛的关注.但是,单个微带天线增益偏低,存在介质损耗和表面波损耗,辐射效率较低,在应用时需要较多的单元构成大型平面阵列天线,导致馈电网络复杂,馈线损耗变大,最终也会造成天线效率的显著下降.近年来,由于超材料(Metamaterials)具有在自然界中并不存在但极具价值的电磁特性,打破了传统材料或结构的物理极限,为经典电磁理论的发展拓展了更大的空间,因此其研究也获得了愈来愈广泛的关注.例如,利用超材料的后向波特性和设计微波隐形材料,利用超材料的负折射特性来拓宽谐振腔频带宽度,同时有效地减小器件尺寸等.此外,超材料还在微波天线方面有广泛的应用:利用其零折射率特性,增强天线的定向性,增大天线的增益;利用其双负材料特性或零阶谐振,可以大幅减小天线尺寸,有利于手机等移动通信设备的小型化设计;利用其电磁带隙特性,可以抑制表面波的传播,提高天线的增益,应用于多天线中还可降低表面波带来的互耦;利用其同相反射特性,可以有效降低天线的剖面等.超材料的发现和发展,为实现高效率发射天线提供了更为有效的途径.因此,探索新型超材料结构,开展超材料在提高天线单元性能和实现低损耗阵列馈电技术等方面的应用研究,具有很高的学术价值与应用价值.

1 超材料的理论与结构研究

目前,国内外对于超材料还没有一个严格的定义,学术界普遍将超材料定义为某种与自然介质的物理特性迥然不同的人工复合材料.广泛研究的超材料包括左手材料(Left-Handed Materials, LHM)、复合左/右手传输线(Composite Right/Left-Handed Transmission Line, CRLH-TL)、电磁带隙结构(Electromagnetic Band-Gap, EBG)、人工磁

导体结构(Artificial Magnetic Conductor, AMC)等。其中,狭义的超材料是指左手材料(LHM),它是一种介电常数与磁导率均为负值的电磁材料,电磁波在其中传播时的群速度与相速度方向相反,因而呈现出许多反常的物理光学现象,如逆 Doppler 效应、逆 Cerenkov 辐射效应、负折射率效应和完美透镜效应等。1968年, Veselago^[1]第一次提出了左手材料的概念。1999年 Pendry 等^[2]设计了由细金属棒(ROD)阵列和金属谐振环(SRR)周期排列组成的左手材料。但是,因为这种谐振型周期结构损耗大、频带窄,实际工程应用比较困难。2002年, Itoh 教授提出了基于周期性 LC 网络的左手材料^[3],当电磁波在该传输线中传播时,在某个频率范围内呈现左手特性,而在其他频率范围内呈现右手特性,所以也被称为复合左/右手传输线(CRLH-TL)。与谐振型左手材料相比,它具有宽频带、低损耗和可控的色散曲线等优点,被广泛应用于微波领域中。另外,电磁带隙结构(EBG)^[4]也是一类比较典型的超材料,在某一频率范围内有带阻特性,在该阻带内任何电磁波不能在其中传播,是光子晶体在微波、毫米波频段的扩展。1999年, Sievenpiper 等^[5]在研究蘑菇型 EBG 结构时发现,该结构在特定频率范围内具有很高的阻抗特性,能够对入射平面波产生同相位反射特性,与理想磁导体类似,因此,这种 EBG 结构又被称人工磁导体(AMC)。

关于超材料的理论研究非常多,主要集中在左手材料的负折射率特性引起的一系列奇异电磁学问题,包括奇异电磁特性、传输特性、交叉极化、非线性效应、各向异性等。谐振型超材料通常采用 Smith 等^[6]提出的反演算法,使用等效介质理论反推出本构参数,而传输线型超材料则需要用到色散关系来进行分析。超材料的这些理论研究使得人们能够更加深入地了解超材料的本质及其奇异特性,对超材料的实现及应用起到了指导作用。

关于超材料的结构设计研究也有很多,主要包括低耗^[7]、宽带^[8]、各向同性^[9]、多频^[10]、可调谐^[11]等诸多性能的设计研究。Ran 等^[8]设计了相对放置的 Ω 形状左手材料,不仅克服了 SRR 环损耗较大的缺点,而且增大了带宽。Koschny 等^[9]设计了一种基于连续交叉金属线和全对称多隙开口谐振环的三维左手材料,并获得很好的各向同性特性。Chen 等^[10]采用两个相对放置的 S 形谐振器来构成左手材料,使得在两个不同频段介电常数和磁导率同时为负。

Zhong 等^[11]提出了一个可调谐的双频段负折射率超材料,由铁氧体板、开口谐振环和金属线组成,呈现两个通带,而且可以通过改变磁偏角达到动态可调。

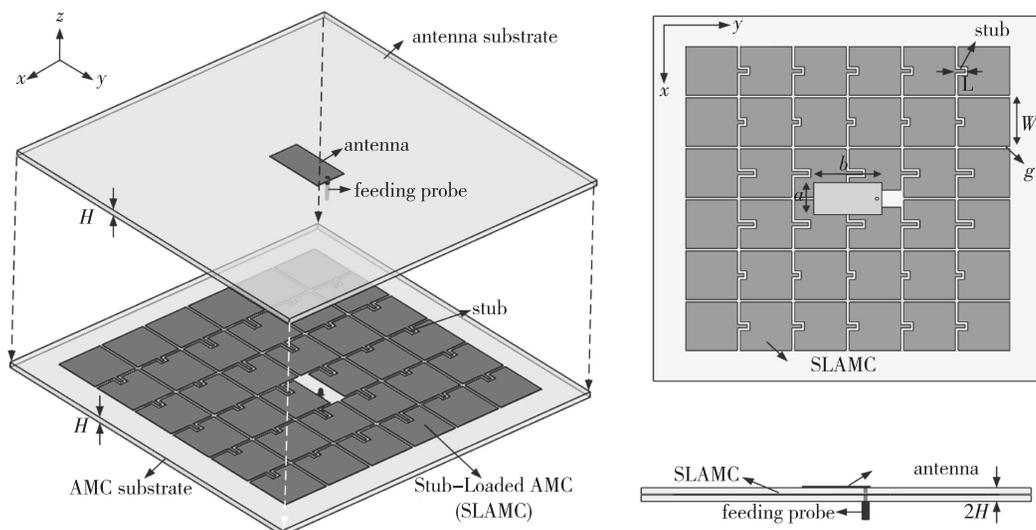
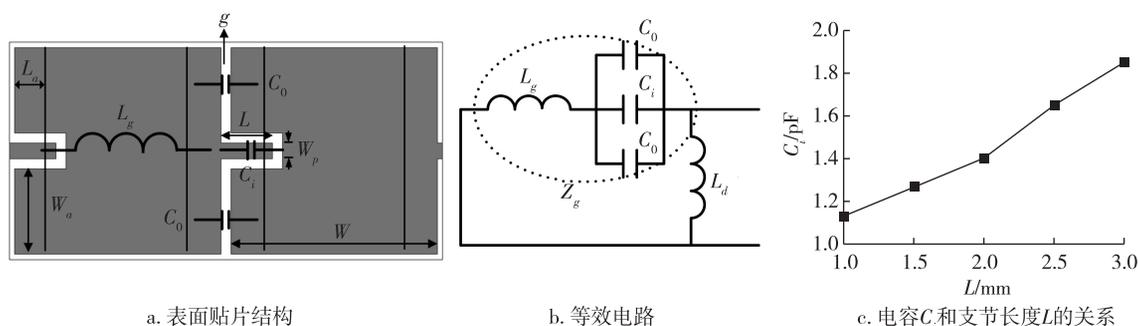
2 基于超材料的高效率平面天线单元的研究

针对现代通信系统对天线效率的性能需求,结合不同天线单元形式,人们提出了许多新型超材料结构^[12-16]。同时,在传统超材料分析方法(如反演算法、色散图法等)的基础上,采用等效电路法、传输线法分析其对电磁波的调控能力,从而实现新型高效率天线单元设计。

2.1 基于非周期型超材料的高口径效率的微带天线单元

众所周知,人工磁导体结构(AMC)作为超材料的一种,具有在特定频率范围内对平面波呈同相位反射的电磁特性,应用于平面天线中,可在保证低剖面的同时大幅度提高天线的辐射增益和带宽^[17-19]。然而,由于该结构是由多个相同单元周期排布组成的,各单元与天线的距离不同会导致各单元耦合强度不一致,从而使得天线辐射口径场的分布不均匀,大部分场强集中在中间区域,导致口径效率较低。为解决此问题,文献[12]提出了基于支节加载的人工磁导体结构(Stub-Loaded AMC, SLAMC),并应用于微带天线中(图1),通过合理优化各单元加载支节的非周期分布来改善天线口径场。由于 AMC 结构在 E 面的尺寸对天线表面电流分布有很大的影响,加载支节的指向与微带天线的 E 面一致,其等效电路如图2所示。和普通 AMC 结构类似,该 SLAMC 结构也可以等效为一个并联的 LC 谐振回路,可以看做是表面贴片结构形成的自谐振阻抗 Z_g 和接地介质板引入的电感 L_i 的并联。其中金属支节可等效为类交指电容 C_i ,随着支节长度 L 的增加,电容 C_i 的数值逐渐增大,且呈线性增长趋势(图2c)。所以,支节长度 L 对 SLAMC 结构的容抗部分有很大的影响,可以明显改变其表面电流分布。如图3所示,加载优化后的非周期 SLAMC 结构,使得天线的近场电场强度明显增强,且幅度分布变得更加一致。因此,该天线获得了很高的增益和口径效率,增益超过了 12 dBi,口径效率为 83.3%。

另外,文献[13-14]提出了长方形人工磁导体结构(Rectangle AMC, RAMC),并从投影等效角度分析设计了具有与圆柱型金属反射体同等强反射能力的

图 1 基于非周期 SLAMC 结构的高效率微带天线^[12]的结构示意Fig. 1 Topology of high-efficiency microstrip antenna using SLAMC structure^[12]图 2 SLAMC 结构单元^[12]的等效电路及电路中电容 C_i 与支节长度 L 的关系Fig. 2 Top view (a), equivalent circuit (b) of the SLAMC cell^[12] and relationship between interdigital-like capacitance C_i and length L (c)

平面非周期 RAMC 地板,实现了高效率的新型平面天线单元设计(图 4).对于三维的金属反射体而言,当馈源位于反射体焦点处,其具有极强的波束汇聚能力,远超平面反射体.但由于该结构是三维立体型,剖面较高,且不易与平面电路集成,应用方面受到了很大的限制.采用投影等效理论可以设计出具有同等反射能力的平面反射板,如图 4a 所示.将该圆柱型金属反射体分割成离散的多个周期型 RAMC 单元,则不同位置 RAMC 单元的高度不同,边缘的第 n 个 RAMC 单元所在位置与中心 RAMC 单元位置的高度差 ΔZ_n 为

$$\Delta Z_n \approx R \left(1 - \cos \left(\frac{[2n+1]\theta}{2} \right) \right), \quad (1)$$

其中, R 是圆柱半径, θ 是每个 RAMC 单元对应的入射角度,可以由 RAMC 沿 x 轴方向的单元尺寸 l_x 计

算得到:

$$\theta \approx \tan^{-1} \left(\frac{l_x}{R} \right). \quad (2)$$

假定沿 y 轴方向的人射电场 E_0 垂直入射到该表面,不同单元之间的高度差会引起较大的波程差.由于 RAMC 结构尺寸对其反射相位特性有很大的影响,该波程差可以通过改变 RAMC 结构 y 方向尺寸获得的反射相位差来补偿,从而在平面情况下实现反射相位等效,如图 4b 所示.这里设定 AMC 结构沿 x 轴方向的边长一致,均为 l_x ,而沿 y 轴方向每排长度一致,但不同排的长度不同,记为 l_n ,从中心向外每排长度依次是 l_1, l_2, l_3 ,上下各排的结构分别对称.这里采用双端口差分馈电来降低微带天线在 H 面的交叉极化电平.图 5 给出了圆柱型金属反射体和提

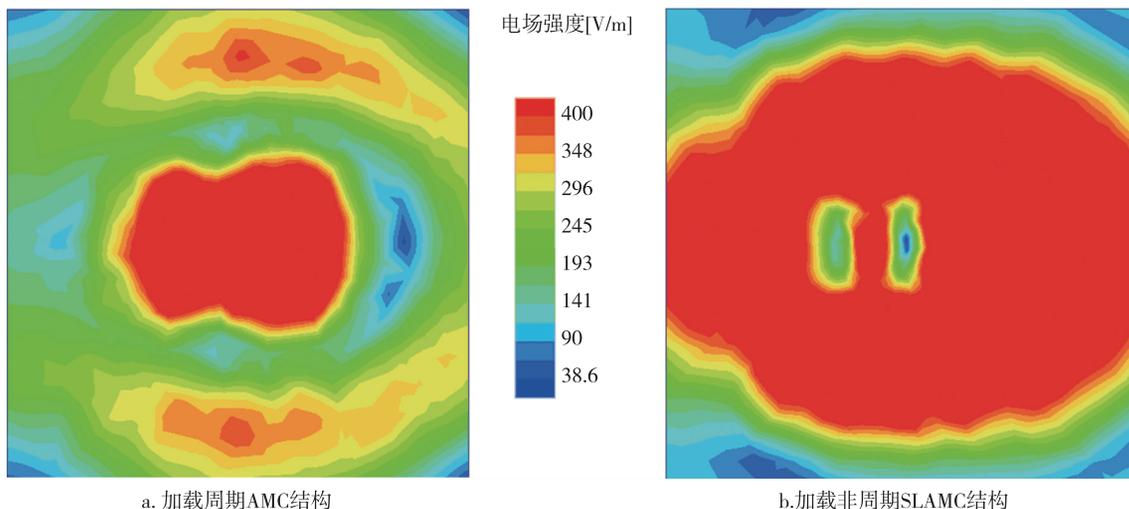


图 3 基于非周期 SLAMC 结构的微带天线^[12]上方近场的电场强度分布与参考天线对比

Fig. 3 Amplitude distributions of the electric field intensity in near field^[12],

(a) for the reference antenna, and (b) for the proposed antenna using the SLAMC plane

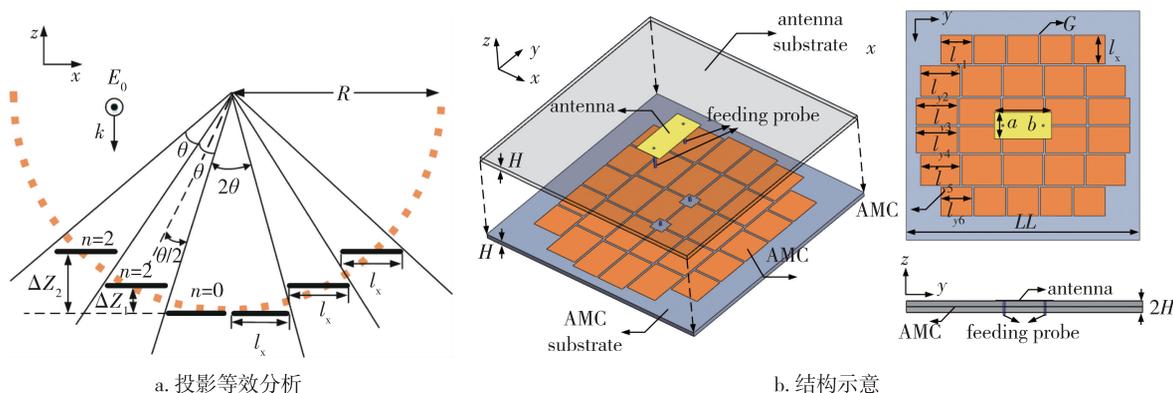


图 4 基于非周期 RAMC 结构的微带天线^[14]的投影等效分析和结构示意图

Fig. 4 The patch antenna using non-periodic RAMC plane^[14], (a) analysis of projection equivalence, and (b) topology

出的非周期 RAMC 平面^[14]的反射特性比较.可以发现,图 5a 中坡印亭矢量分布说明了金属圆柱可以沿垂直方向最大程度地反射电磁波,而且提出的非周期 RAMC 平面具有类似的坡印亭矢量分布;图 5b 中金属圆柱周围磁场沿着 y 轴方向的一条直线逆时针旋转,该直线可以认为是此金属圆柱的焦线,而且提出的非周期 RAMC 平面具有类似的磁场分布,但是其焦线在 RAMC 结构表面.因此,可以认为,当天线位于该平面非周期 RAMC 地板表面时,具有与圆柱型金属反射体同等的强反射能力,最终实现了口径效率超过 90% 的新型高定向性平面天线设计.在此基础上,圆柱投影等效的非周期 RAMC 平面可以拓展应用于球体投影等效的非周期平面设计中,用于

实现高效率的新型双极化 MIMO 天线设计.如图 6 所示,通过同时改变 RAMC 结构沿 x 和 y 方向尺寸,获得了口径效率超过 90% 且极化隔离达到 30 dB 的新型双极化 MIMO 平面天线,为高性能的多功能 MIMO 天线设计提供了有效的技术参考.

2.2 基于周期型超材料辐射元的高效率新型天线

超材料除了具有特殊的电磁波调控能力外,还可以作为新型天线^[15-16]向外部辐射电磁波.文献 [15] 中将多个周期型蘑菇型超材料结构作为新型辐射元,采用基片集成波导 (Substrate Integrated Waveguide, SIW) 缝隙馈电,实现了 60 GHz 宽带高效率的平面天线设计.由于传统微带天线是一种谐振天线,其尺寸跟工作频率相对应.当工作在较高或较

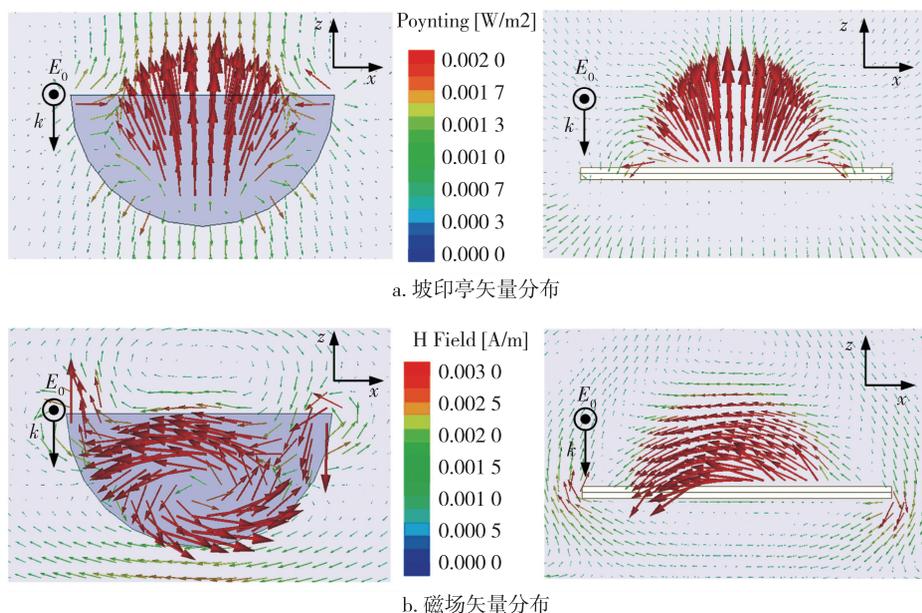


图5 圆柱型金属反射体和圆柱投影等效的非周期 RAMC 平面^[14]的反射特性比较

Fig. 5 Comparisons of the cylindrical metal reflector (left) and the cylindrically-projected non-periodic RAMC plane^[14] (right) under normal incidence, (a) Poynting vector distributions, and (b) total magnetic field distributions

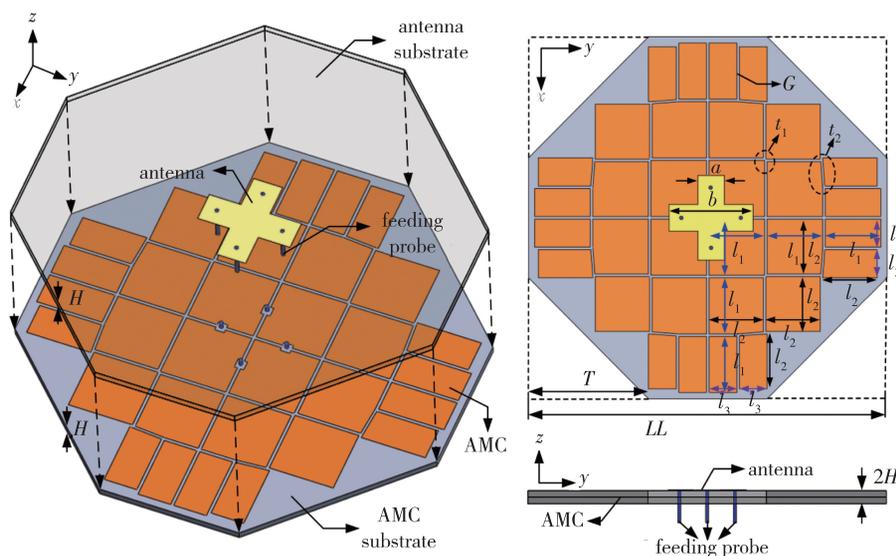


图6 基于非周期 RAMC 结构的双极化 MIMO 微带天线^[14]的结构示意

Fig. 6 Geometry of the dual-polarized patch antenna using non-periodic RAMC structures^[14]

低频率时,天线尺寸都会面临较大或较小等问题而难以设计.但是,超材料具有很好的谐振特性,其谐振特性不仅与单元结构尺寸相关,而且与相邻单元间距、基板厚度以及单元个数相关,很容易实现高效率的电大或电小天线.文献[15]针对毫米波天线,将多个蘑菇型超材料作为辐射单元,并采用微带线的传输理论分析该新型辐射元的谐振模式及频率.图

7a、7b 中分别给出了 4×4 、 2×2 蘑菇型超材料结构的传输线模型.通过相移结果的分析(图 7c),可以发现两个 180° 相移频点均在 60 GHz 附近,分别对应着 TM_{10} 模和 TM_{20} 模的谐振频率,从而可以获得较宽的工作带宽.基于该超材料辐射单元,设计了基于 SIW 缝隙馈电的新型毫米波天线,如图 8a 所示.图 8b、8c 分别给出了普通微带天线和提出的新型超材料天线

的驻波特性和增益特性,这里普通微带天线设计了不同厚度和加金属壁的情况.比较发现,提出的新型超材料天线的 $|S_{11}|$ 低于 -10 dB的工作带宽为11.6%,远大于两层介质的普通微带天线,与四层介质的普通天线带宽类似;但是,其增益远大于所有普通微带天线,最大辐射增益为9.5 dBi,比具有最高增益的普通微带天线还高了4 dBi左右,且带内增益均超过了8 dBi,这是由于超材料新型天线在毫米波段尺寸仍然可以设计较大,其面积几乎充满了整个辐射口径,从而提高了天线的增益.新型超材料天线的提出与应用,解决了普通微带天线尺寸受频率限制而无法广泛应用于较高或较低频段的问题.除此之外,超材料作为新型天线,还可以用于宽带高增益的低剖面圆极化天线设计^[16].

2.3 基于周期型超材料的高效率低剖面的金属偶极子天线

对于天线单元来说,天线辐射效率 e_r 为辐射功率 P_r 与输入功率 P_{in} 之比,而输入功率 P_{in} 由辐射功率 P_r 和损耗功率 P_L 组成,即

$$e_r = \frac{P_r}{P_r + P_L} = \frac{R_r}{R_r + R_L}, \quad (3)$$

其中 R_r 和 R_L 分别为归于同一电流的辐射电阻和损耗电阻.可以发现,损耗功率越小,辐射效率越高.对于一般天线而言,在损耗功率中主要考虑的是天线本身的导体损耗、介质损耗和表面波损耗.在传统平面天线的损耗中,介质损耗的数值较大,远大于导体损耗.由于该损耗由介质基板引入,随着介质损耗角增加而增加.为提高天线的辐射效率,采用空气作为天线介质,从而避免介质损耗,是很好的解决方案之一.与微带天线相比,偶极子天线具有较宽的带宽和较高的辐射效率,但与反射地板间需要一定的高度,尤其采用空气介质时高度达到 $1/4$ 波长,很难应用于低剖面平面天线中.

针对此问题,文献[20]提出了基于高阻抗表面(High-Impedance Surface, HIS)的高效率低剖面蝶形金属偶极子天线,如图9a所示,即在金属偶极子天线下方加载多个周期排布的高阻抗表面(HIS).由于HIS具有远大于自由空间阻抗的表面阻抗,在特定

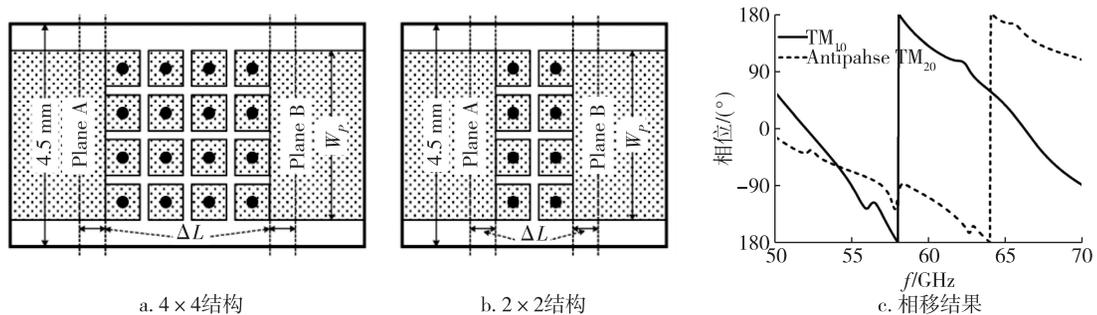


图7 用于分析蘑菇型超材料谐振频率的传输线模型^[15]

Fig. 7 Transmission-line models for estimating the resonance frequencies of operating modes of mushroom-type metamaterial^[15]

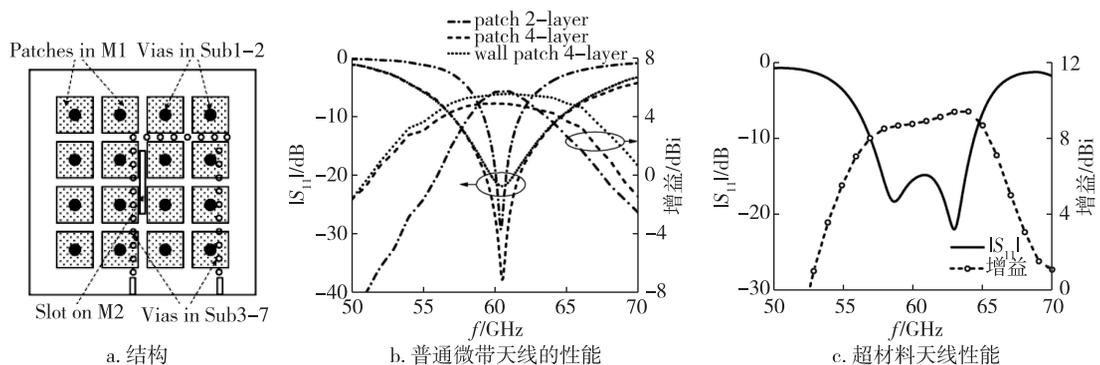


图8 SIW 缝隙馈电的蘑菇型超材料天线^[15]的结构与性能对比

Fig. 8 Geometry and performance comparisons of SIW fed mushroom antenna element^[15],

(a) geometry, (b) performance of patch antenna, and (c) performance of metamaterial antenna

频段内呈现类似于理想磁导体的零相位反射特性(图9b),使偶极子天线在低剖面时仍能实现同相叠加的辐射性能,获得较高的辐射效率.这不仅避免了介质损耗,提高了天线的辐射效率,而且天线的高度可降低至0.1个波长以内,比较适合用于高效率的平面天线设计.

3 低损耗的天线阵列技术研究

对于阵列天线而言,馈电网络往往会产生较大的损耗.天线阵列的效率为

$$e = e_r e_f = \frac{P_r}{P_r + P_{L1} + P_{L2}} = \frac{R_r}{R_r + R_{L1} + R_{L2}}, \quad (4)$$

式中 e_f 为馈电网络的效率, R_{L1} 和 R_{L2} 分别为天线和馈电网络的损耗.为提高天线阵列的辐射效率,尽可能降低阵列馈电网络损耗是一种有效途径.有学者采用高次模激励^[21-22] 天线阵列的子阵,从而减少馈

电网络的级数,降低网络损耗;还有采用新型低损耗传输线^[23-24] 实现阵列馈电网络,从而尽可能减少网络损耗,提高系统的整体效率.

3.1 基于高次模激励的低损耗高效率天线阵列

近年来,文献[21-22]提出了新型腔体高次模的馈电技术来激励 2×2 、 3×3 或 5×5 的天线子阵列,应用于大型天线阵列中,可取代天线阵列最后几级的馈电网络,减小网络部分的损耗,提高天线阵列的整体效率.如图10所示,采用同轴探针中心底馈来激励正方形的基片集成波导(Substrate Integrated Waveguide, SIW),腔体内部形成了 TE_{330} 高次模.根据腔体内部的场分布(图10a)发现,在SIW上表面交错地放置9个窄型辐射缝隙,可使所有缝隙辐射出来的能量同相位叠加,从而实现了无馈电网络的 3×3 SIW 缝隙天线阵^[21].在此基础上,在每个缝隙上方呈 45° 放置一个寄生贴片,可实现圆极化辐射(图

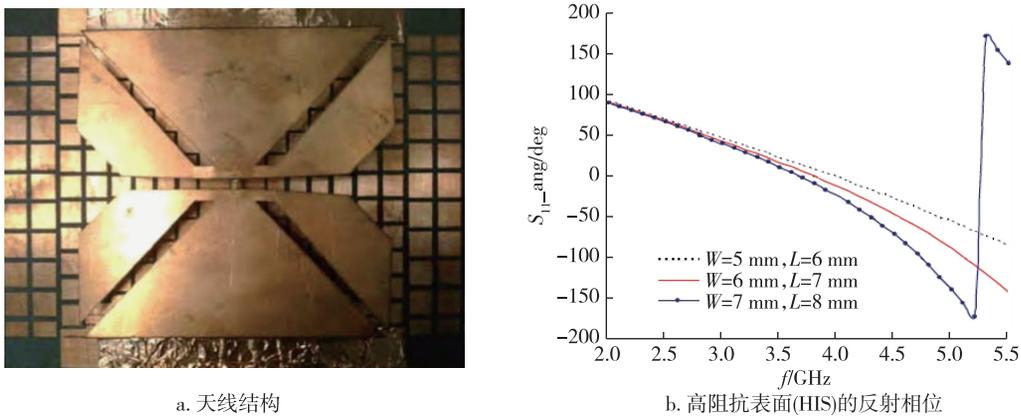


图9 基于高阻抗表面的蝶形金属偶极子天线^[20] 的结构与高阻抗表面的反射相位特性

Fig. 9 (a) Geometry of bowtie electric dipole on a HIS substrate, and (b) reflection phase of HIS^[20]

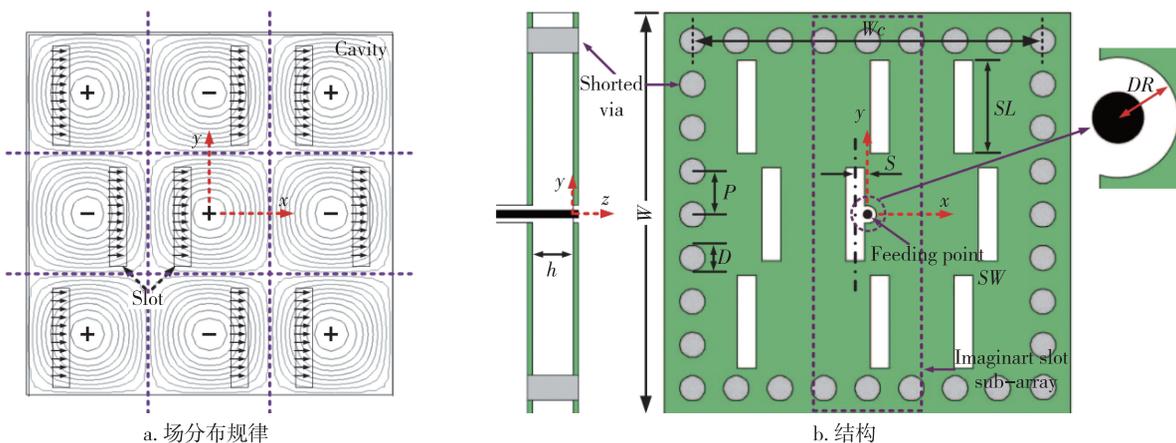


图10 基于 TE_{330} 高次模的 3×3 缝隙天线阵^[21]

Fig. 10 Principle (a) and geometry (b) of the 3×3 slot antenna array using TE_{330} modes^[21]

11).该技术同样可以应用到更高的奇次模中,进一步减少馈电网络的级数,但需要对各个单元的幅度进行补偿,以保证各单元的幅度一致性,从而获得较高的口径效率。

同时,也可采用偶次模^[22]来进行天线子阵激励,提高天线阵列效率.如图12所示,在SIW腔体中心采用缝隙耦合馈电,腔体内部形成了TE₂₂₀高次模场分布.然后在SIW上表面开4个方形辐射缝隙.由于耦合缝隙的上下部分相位相差180°,下方2个缝隙偏置应与上方的2个缝隙相反,从而使所有缝隙辐射出来的能量同相位叠加,实现无馈电网络的高效率2×2 SIW 缝隙天线子阵^[22]。

3.2 基于新型传输线的低损耗阵列馈电技术

在天线阵列馈电网络的设计中,常采用的微波

传输线包括金属波导、微带、带状线和基片集成波导等.其中,波导以其功率容量大、插损小、可靠性高等优点获得广泛应用,但它体积大、成本高,不适用于平面天线和大规模阵列中.微带传输线具有低剖面、体积小、质量轻、成本低等优点,但其功率容量低,且作为阵列馈电网络时,会产生寄生辐射,影响天线阵列的辐射特性,存在的辐射损耗也会恶化天线的辐射效率.基片集成波导(SIW)具备波导和微带线的双重优点,低剖面、体积小、成本低,具有较大的功率容量和较高的Q值,没有辐射损耗.但是在低频段,SIW的传输损耗比微带线大,这是由于较大的介质损耗引起的.近年来,文献[23-24]提出了一种新型的合成波导——缝隙波导(Gap WaveGuide, GWG),如图13a—13b所示.该波导分为上下两层,上层为空

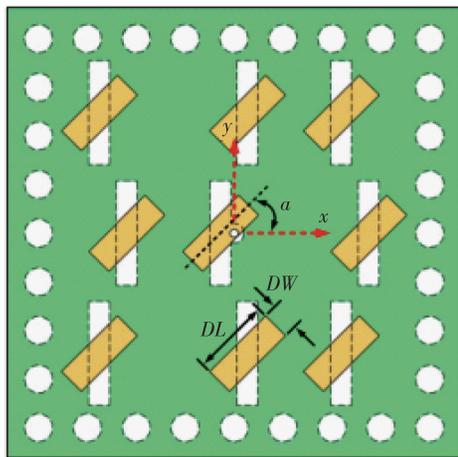


图11 基于TE₃₃₀的圆极化缝隙天线阵^[21]

Fig. 11 TE₃₃₀-based CP slot antenna array^[21]

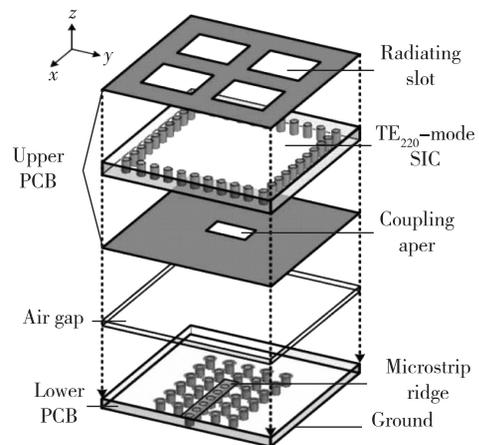


图12 基于TE₂₂₀的2×2缝隙天线阵^[22]

Fig. 12 TE₂₂₀-based 2×2 slot antenna array^[22]

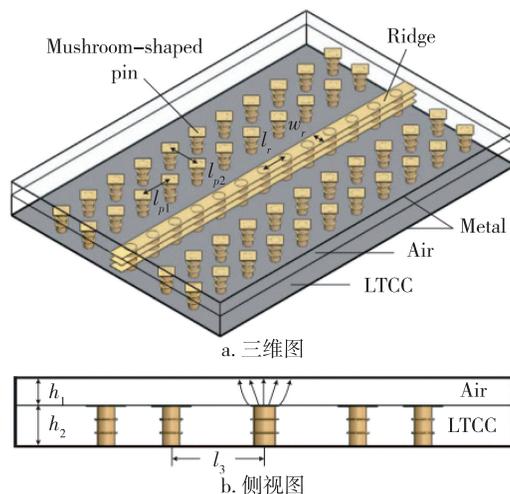
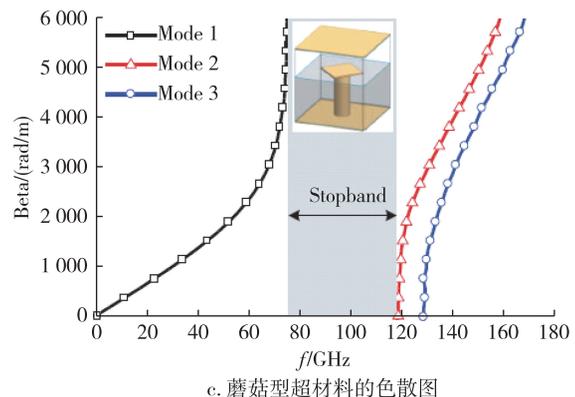


图13 介质基片的缝隙波导GWG^[23](a)三维图(b)侧视图(c)蘑菇型超材料的色散图

Fig. 13 The Gap Wave Guide proposed by [23], (a) 3D view, (b) side view, and (c) dispersion diagram of the mushroom-pin in GWG



气,下层为介质,下层中间有一个条带型脊,两边有多个蘑菇型超材料结构周期性排列.蘑菇型超材料具有表面波阻带特性,如图 13c 所示,电磁场几乎完全被束缚在脊的上方.由于空气层的存在,该 GWG 结构可以部分摆脱介质的束缚,使传输损耗明显低于 SIW,同时保证了较低的剖面.因此,将该新型传输线作为天线阵列的馈电网络,或者是天线子阵的馈电网络,可以大大减小网络的插入损耗,尤其针对较大规模阵列,低损耗优势更为明显.但需要进一步研究新型传输线与其他传输线的低损耗过渡结构,提高其与其他平面电路的兼容性,更大程度地增大系统的效率.

4 总结

本文结合微波能量传输系统对发射天线高效率的需求,分别介绍并总结了近几年来超材料在提高平面天线单元效率和降低阵列馈电网络损耗等方面的研究工作,为实现高效率发射天线阵列的研究提供了技术参考,可以为无线能量收集所需的高效率天线提供一些设计指导.但这些技术大多只能独立改善天线效率,与其他技术的兼容性尚未考虑.因此,如何结合这些技术,或将超材料技术与其他提高效率方法结合,是今后需要研究的重要课题.

参考文献

References

- [1] Veselago V G. The electrodynamics of substance with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4) :509-514
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11) :2075-2084
- [3] Caloz C, Sanada A, Itoh A T. Microwave applications of transmission line based negative refractive index structures [C] // Asia-Pacific Microwave Conference, 2003
- [4] Gonalo R, De Maagt P, Sorolla M. Enhanced patch-antenna performance by suppressing surface waves using photonic-bandgap substrates [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47 (11) : 2131-2138
- [5] Sievenpiper D, Zhang L J, Broas R F J, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(11) :2059-2074
- [6] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2005, 71 (3 Pt 2B), DOI: 10.1103/PhysRevE.71.036617
- [7] Langley D, Coutu R A Jr, Collins P J. Low-loss meta-atom for improved resonance response [J]. AIP Advances, 2012, 2:012196
- [8] Ran L X, Huangfu J, Chen H S, et al. Microwave solid-state left-handed material with a broad bandwidth and an ultralow loss [J]. Physical Review B, 2004, 70(7) :1-3
- [9] Koschny T, Zhang L, Soukoulis C M. Isotropic three-dimensional left-handed metamaterials [J]. Physical Review B, 2005, 71(12), DOI: 10.1103/PhysRevB.71.121103
- [10] Chen H S, Ran L X, Huangfu J, et al. Metamaterial exhibiting left-handed properties over multiple frequency bands [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 96 (9) : 5338-5340
- [11] Zhong J P, Huang Y J, Wen G J, et al. Tunable dual-band negative refractive index metamaterial consisting of ferrites and SRR-wires [J]. Procedia Engineering, 2012, 29(4) :797-801
- [12] Yang W C, Che W Q, Wang H. High-gain design of a patch antenna using stub-loaded artificial magnetic conductor [J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2013, 12(5) :1172-1175
- [13] Chen D X, Che W Q, Yang W C. Novel high-efficiency microstrip patch antennas using non-periodic artificial magnetic conductor structure [C] // Asia-Pacific Microwave Conference, 2015, DOI: 10.1109/APMC.2015.7411678
- [14] Yang W C, Chen D X, Che W Q. High-efficiency high-isolation dual-orthogonally polarized patch antennas using non-periodic RAMC structure [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 99, DOI: 10.1109/TAP.2016.2632700
- [15] Liu W, Chen Z N, Qing X M. 60-GHz thin broadband high-gain LTCC metamaterial-mushroom antenna array [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(9) :4592-4601
- [16] Ta S X, Park I. Low-profile broadband circularly polarized patch antenna using metasurface [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63(12) :5929-5934
- [17] Yang F, Rahmat-Samii Y. Reflection phase characteristics of the EBG ground plane for low profile wire antennas [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2003, 51(10) :2691-2703
- [18] Foroozesh A, Shafai L. Application of combined electric and magnetic-conductor ground planes for antenna performance enhancement [J]. Canadian Journal of Electrical & Computer Engineering, 2008, 33(2) :87-98
- [19] Yang W C, Wang H, Che W Q, et al. A wideband and high-gain edge-fed patch antenna and array using artificial magnetic conductor structures [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2013, 12(9) : 769-772
- [20] Liu Y, Luk K M, Yin H C. Bowtie patch antenna with electric dipole on a HIS substrate [C] // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, 2010:278-280
- [21] Han W W, Yang F, Ouyang J, et al. Low-cost wideband and high-gain slotted cavity antenna using high-order

- modes for millimeter-wave application[J].IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2015, 63 (11): 4624-4631
- [22] Cao B L, Wang H, Huang Y. W-band high-gain TE₂₂₀-mode slot antenna array with gap waveguide feeding network[J].IEEE Antennas and Propagation Letters,2016, 15:988-991
- [23] Wang H, Cao B L, Huang Y, et al.High-gain L-probe excited substrate integrated cavity antenna array with LTCC-based gap waveguide feeding network for W-band application[J].IEEE Transactions on Antennas & Propagation,2015,63(12):5465-5474
- [24] Cabello C S, Rajo-Iglesias E.Low cost self-diplexed antenna in inverted microstrip gap waveguide technology [C]//Proceedings of ISAP,2014:169-170

Investigations of high-efficiency transmitting antennas based on novel metamaterial structures

YANG Wanchen¹ CHE Wenquan¹ CHEN Dongxu¹ CHEN Si¹

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

Abstract In recent years, metamaterial has broken physical limitations of traditional materials and structures, which would bring new development of high-efficiency transmitting antennas. It has got more and more attentions. In this paper, the research overview of the theory and structure of metamaterial have been introduced at first. Furthermore, the researches of several novel metamaterial technologies on improving the efficiency of planar antenna elements are specifically given and analyzed, including non-periodic metamaterial technology, metamaterial as novel radiation elements or low-profile reflection plane, etc. Finally, aiming at the requirement of wireless energy harvesting on high-efficiency antenna array, excitations using high-order modes and novel low-loss transmission lines have been introduced for low-loss feeding networks of antenna arrays and higher system efficiency.

Key words metamaterial; low loss; non-periodic; high-order modes; efficiency