

用于复杂电磁环境的能量收集表面<sup>\*</sup>

王卫宾 周永金

(上海大学特种光纤与光接入网重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 用于在多频带、极化方式多样、宽入射角度的复杂电磁环境中有效收集电磁能量,提出了一个超材料单元,它由8个开口谐振环并按照正八边形排列,内部添加一个正八边形的寄生贴片。8个相同的开口谐振环经旋转排列,结合内部的寄生贴片形成中心对称结构,设计了一种新颖的电磁能量收集表面,具有多频、宽入射角度、极化不敏感的工作特性。使用微波仿真软件 CST 对组成该电磁能量收集表面的超材料单元的结构尺寸进行了分析和优化,对垂直入射的电磁波的电磁能量收集效率、单元上的能量分布以及 S 参数进行了研究。仿真结果表明,当电磁波垂直入射时,在 5.75、6.5、6.84、7.56、7.98、8.55 GHz 6 个频段处分别达到 82%、79%、61%、71%、70%、73% 的最大收集效率;在 0°~60° 以 20° 为间隔的斜入射下,该表面对 TE 波和 TM 波都可以保持有效的收集效率。

**关键词:** 多频;极化不敏感;宽入射角度;电磁能量收集

**中图分类号:** TN04; TB34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Energy harvesting surfaces in complex electromagnetic environments

Wang Weibin Zhou Yongjin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In order to harvesting electromagnetic(EM) energy effectively in the complex electromagnetic environment, a novel metasurface is proposed, whose unit consists of eight open resonant loops and is arranged in a regular octagon, with the addition of a parasitic patch of regular octagon. Eight resonant rings with the same opening are arranged in rotation, and the inner parasitic patch is used to form a central symmetrical structure. A novel electromagnetic energy collecting surface is designed, which has multi-frequency and polarization-insensitive working characteristics. The microstructures of the metamaterials are analyzed and optimized by the microwave simulation software CST. The electromagnetic energy collection efficiency, the energy distribution and the S parameters of the incident electromagnetic waves are studied. The simulation results show that the maximum collection efficiencies of 82%, 79%, 61%, 71%, 70% and 73% at five frequencies of 5.75, 6.5, 6.84, 7.56, 7.98 and 8.55 GHz when the electromagnetic waves are incident vertically; In the 0° to 60° at 20° interval oblique incidence, the surface of the TE wave and TM wave can maintain an effective collection efficiency.

**Keywords:** multi-frequency; polarization-insensitivity; wide-angle; electromagnetic energy harvesting

## 0 引言

随着无线通信技术<sup>[1-3]</sup>的发展,人类生活的环境中充满了各种类型的电磁波。近些年,如何有效地回收利用电磁能量已经引起了人们的重视。由接收天线和整流电路组成的整流天线<sup>[4-6]</sup>只能有效地捕获环境中特定极化方式和入射角度的电磁能量并转化为直流能量。然而,实际的电磁环境在入射角度、极化方式和工作带宽等方面各不相同。由于超材料独特的物理特性,基于超材料的研究已深入多个领域,比如吸波材料<sup>[7-10]</sup>、完美透镜和隐身材料<sup>[11]</sup>等。不

同于吸波材料,电磁能量收集表面不仅可以像吸波材料一样有效地吸收入射的电磁能量,而且能将吸收的能量最大化地传递到负载上,以便回收后进行能量传输<sup>[12]</sup>。电磁能量收集表面的研究主要基于两种典型的结构,开口谐振环(SRR)和互补开口谐振环(CSRR)。可以工作在单一频带<sup>[13-15]</sup>和多频带<sup>[16]</sup>的能量收集表面已被研究,但它们都只能针对特定方向的线极化波。因此,设计兼具多频带、宽入射角度和极化不敏感工作特性的电磁能量收集表面具有重要意义<sup>[17]</sup>。

收稿日期:2017-02

\* 基金项目:国家自然科学基金(61307129)、上海市科学技术委员会(13ZR1454500)、高等学校博士学科点专项科研基金(20133108120016)资助项目

## 1 电磁能量收集超表面的设计

超材料单元,由上层的特殊金属拓扑结构、中层介质板和下层接地板组成如图 1、2 所示。上层的特殊金属拓扑结构,采用了由 8 个相同的开口谐振环经旋转排列成的中心对称结构,达到对垂直入射波实现极化不敏感的工作特性。一方面,相较于传统接收天线,近距离的单元间距  $g$  增加了单元间的耦合强度,从而提高了效率。另一方面,通过引入内部寄生贴片增强了单元内的耦合强度。同时,这种八边形的布局通过不同(单元内(间))的耦合类型形成了多频的特性。为了有效地回收入射到其表面的电磁能量,在 8 个开口谐振环的长边中点处开圆形金属通孔至背面地板,并与地板隔离,在地板和通孔的间隙处接入匹配电阻收集能量。该电磁能量收集表面具有剖面低结构紧凑的特点。

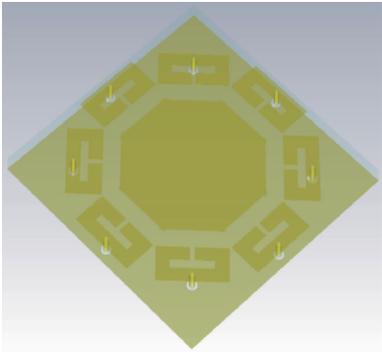


图 1 超材料单元的透视图

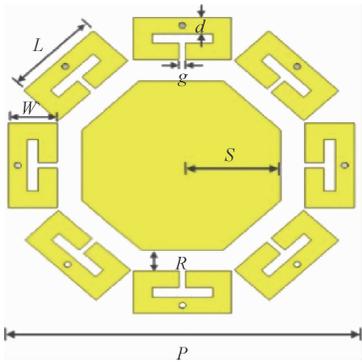


图 2 超材料单元的俯视图

在超材料单元设计中,采用 Rogers 5880 的介质板,介质板厚度为 1.524 mm,介电常数  $\epsilon = 2.2$ ,损耗角正切  $\tan D = 0.001$ ,金属部分均采用厚度为 0.035 mm 的铜箔。仿真优化单元具体尺寸,开口谐振环边长  $L = 16$  mm,线宽  $W = 3.1$  mm,相邻开口谐振环间距  $g = 1$  mm,金属通孔直径为 1.2 mm,寄生贴片  $S = 16$  mm,单元边长  $P = 58$  mm。

## 2 电磁能量收集表面的仿真分析

### 2.1 仿真设计

该电磁能量收集表面的设计目的是以实现收集效率和多频特性为出发点的,这里首先需要明确吸收效率和收集效率的定义。吸收效率是指超材料单元对电磁波的吸收能力,可表示为其中  $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别表示反射系数和传输系数。由于背面采用几乎连续的接地板,使得传输系数为 0。因此,提高吸收效率只需要通过减小反射系数来实现。收集效率是指入射到单元表面上的电磁能量传递到电阻上的能力,可表示为:

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (1)$$

式中: $S_{11}$  和  $S_{21}$  分别表示反射系数和传输系数。由于背面采用几乎连续的接地板,使得传输系数为 0。因此,提高吸收效率只需要通过减小反射系数来实现。

收集效率是指入射到单元表面上的电磁能量传递到电阻上的能力,可表示为:

$$\eta = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{inc}}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{load}}$  和  $P_{\text{inc}}$  分别表示传递到单元的 4 个电阻上的能量和入射到单元表面的电磁能量。

将该超材料单元视为无限大阵列的组成单元,使用仿真软件 CST Microwave Studio 进行仿真。在该单元的 4 个侧面设置周期性边界条件来模拟无限大的二维阵列,同时在单元的顶面设置 Floquet 端口进行激励,来模拟具有 0.5 W 的电磁能量垂直入射到该单元表面。为了仿真该超材料单元可以回收利用的能量,在每一个开口谐振环的通孔和地板之间接入匹配电阻。本设计的匹配电阻采用  $50 \Omega$ ,由于单元的结构和尺寸确定之后,就必然存在一个最优的阻值使得性能达到最佳,这个最优的阻值与单元拓扑结构,介质板参数和通孔的位置之间重要的关系。

### 2.2 垂直入射下的工作性能

为了说明该电磁能量收集表面在任意极化方式的垂直入射波下具有极化不敏感的工作特性。在 Floquet 端口的垂直激励下,仿真了极化方向分别沿 X 轴(TM 波)和沿 Y 轴(TE 波)所对应的吸收效率以及单元上的能量分布,如图 3、4 所示。可以看出该电磁能量收集表面在两种极化正交的垂直入射波激励下,表现出相同的收集效率。具体而言,在 5.75、6.5、6.84、7.56、7.98、8.55 GHz 多个频点处分别达到 82%、79%、61%、71%、70%、73% 的最大收集效率。根据电场矢量的分解特性,很容易发现该表面对任意极化的垂直入射波(包括任意线极化和任意圆极化)都可以产生相同的收集效率。

同时为了说明吸收效率和收集效率之间的关系,探究了单元内能量的分布情况,如图 4 所示,通过观察发现以下几点。1)在整个频带内分布在导体和介质板上的能量总和和只占入射能量的 2%。2)由于导体和介质损耗较小,被

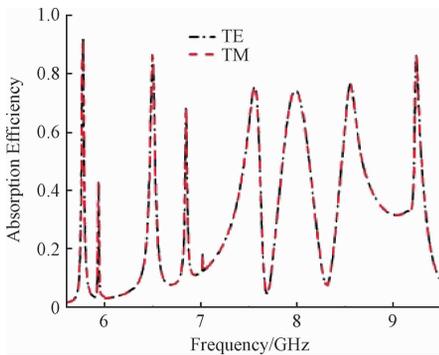


图 3 垂直入射下的吸收效率

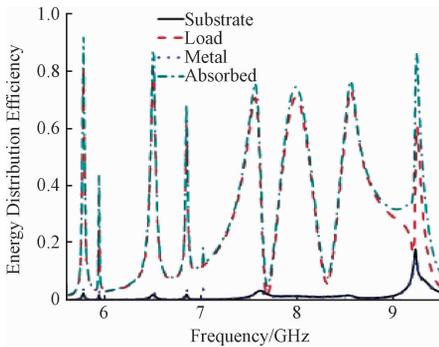


图 4 垂直入射下能量分布

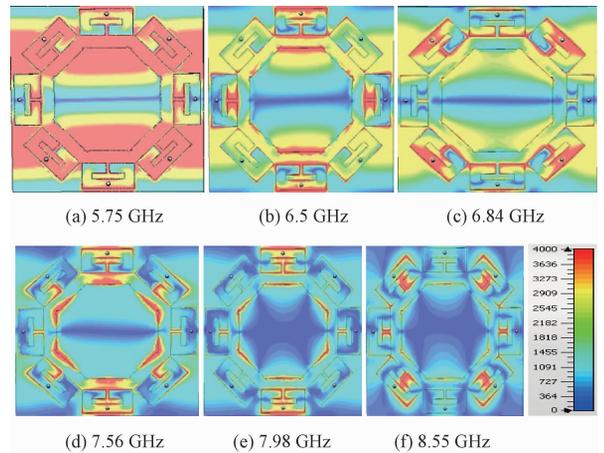


图 5 垂直入射下的电场能量分布

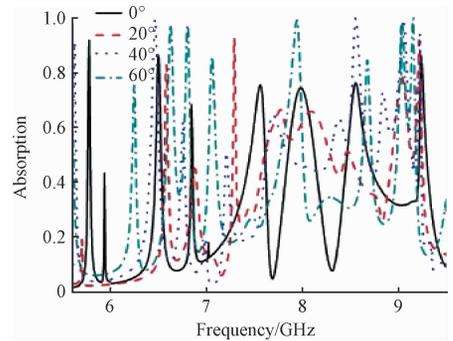


图 6 不同入射角对应的 TM 波的吸收效率

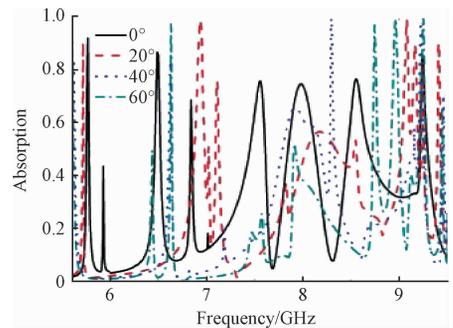


图 7 不同入射角对应的 TE 波的吸收效率

吸收的能量几乎完全地传递到了负载上,造成吸收效率和收集效率在数值上几乎对等。值得一提的是,通孔位置的选择对以上现象(吸收能量完全传递到负载上)的产生具有至关重要的作用。

### 2.3 谐振机理

为了进一步说明该单元在电磁波激励下的谐振机理,探究了垂直入射下单元在不同频点的表面电场分布。如图 5 所示,做了如下观察:首先,由于单元间不同类型耦合的存在,可以发现不同谐振频率对应的电场分布是不同的,随着频率的上升开口环上的有效的电场分布范围逐渐收缩,据此判断谐振频率与电场分布有关;其次不同的谐振频率下,开口环附近均存在较强的电场。这些开口环附近的集中分布的电场体现了该超材料单元能够将能量吸收并集中在开口环上用以收集。

### 2.4 斜入射下的工作性能

最后,探究了斜入射下对应的收集效率,分别对 TE 波和 TM 波对应的斜入射激励进行仿真,如图 6、7 所示,可以发现随着入射角增大,频带发生了一定的偏移。对 TM 波而言,在入射角从在阶跃变化到的过程中,各个频带内的最大收集效率逐渐上升(均超过 85%);对 TE 波而言,在入射角从在变化到的过程中,7.5~8.5 GHz 的频段内的最大收集效率出现明显的下降;但是,当在在变化到斜入射下超表面仍然表现出多频极化不敏感的特性,在复杂多变的电磁

环境中仍然可以有效的收集电磁能量,整体上具备了宽入射角度的特点。

## 3 结 论

本文利用 CST 仿真软件对其结构进行了仿真。垂直入射下的仿真结果表明,这种基于超材料的电磁能量收集表面具有多频和极化不敏感的特性;斜入射下的仿真结果表明,其结构具备宽入射角度的优点。根据上面的仿真分析,本文设计的这种基于超材料的多频极化不敏感宽入射角的电磁能量收集表面适合在极化方式多样、入射角度多

变、频段多样的复杂电磁环境中收集电磁能量。此外,该电磁能量收集表面还可以作为电磁能量传感器,具有很高的应用价值。

## 参考文献

- [1] 蒋嘉柔,苏寒松,李婷. 基于手机终端无线通信系统的设计与实现[J]. 电子测量技术,2015,38(10):122-130.
- [2] 方如举,王建平,孙伟. 无线传感器网络通信的拥塞控制策略[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(4):558-567.
- [3] 金鑫. 基于PXI的无线通信远程实验平台的设计[J]. 国外电子测量技术,2015,34(3):81-84.
- [4] LU P, YANG X S, LI J L, et al. Polarization reconfigurable broadband rectenna with tunable matching network for microwave power transmission[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(3):1136-1141.
- [5] NIE M J, YANG X X, TAN G N, et al. A compact 2.45-GHz broadband rectenna using grounded coplanar waveguide[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015(14): 986-989.
- [6] SONG C, HUANG Y, ZHOU J, et al. A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2015, 63(8): 3486-3495.
- [7] SHI C, ZANG X F, JI X B, et al. Ultra-broadband terahertz perfect absorber based on multi-frequency destructive interference and grating diffraction[J]. Physics,2014,arXiv:1409.6103.
- [8] LEE K T, JI C, GUO L J. Wide-angle, polarization-independent ultrathin broadband visible absorbers[J]. Applied Physics Letters, 2016,108(3): 031107.
- [9] JIA X. L, MENG Q X, YUAN C X, et al. Visible light broadband perfect absorbers [J]. Physics of Plasmas,2016,23(3): 032103.
- [10] HE Y, JIANG J J, CHEN M, et al. Design of an adjustable polarization-independent and wideband electromagnetic absorber [J]. Journal of Applied Physics,2016,119(10):105103.
- [11] RAMAHI O, ALMONEEF T, ALSHAREEF M. Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(17): 173903.
- [12] 杨明博,管延智,李强,等. 磁共振无线能量传输拓扑结构特性研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(10):2382-2391.
- [13] ALAVIKIA B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Complementary split ring resonator arrays for electromagnetic energy harvesting [J]. Applied Physics Letters,2015, 107(3): 033902.
- [14] ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(15):153902.
- [15] ASSIMONIS S D, KOLLATOU T, TSIAMITROS D, et al. High Efficiency and triple-band metamaterial electromagnetic energy harvester[C]. ELECO, 2015: 320-323.
- [16] Alavikia B, ALMONEEF T S, RAMAHI O M. Wideband resonator arrays for electromagnetic energy harvesting and wireless power transfer[J]. Applied Physics Letters,2015, 107(24):1030-1035.
- [17] ZHONG H T, YANG X X, TAN C, et al. Triple-band polarization-insensitive and wide-angle metamaterial array for electromagnetic energy harvesting [J]. Applied Physics Letters,2016, 109(25):253904.

## 作者简介

王卫宾,1990年出生,工学硕士,主要研究方向为电磁能量收集系统。

E-mail:wangweibin@i.shu.edu.cn

周永金(通讯作者),上海大学副教授,博士,主要研究方向为表面等离子激元波导及器件等。

E-mail:yjzhou@shu.edu.cn