

S 波段超材料完全吸收基板微带天线*

保石 罗春荣 赵晓鹏†

(西北工业大学应用物理系智能材料实验室, 西安 710129)

(2010 年 1 月 27 日收到; 2010 年 3 月 29 日收到修改稿)

设计了基于树枝状结构单元模型的完全吸波超材料, 并将此树枝状结构完全吸波超材料作为微带天线的基板, 制备了 S 波段超材料完全吸收基板微带天线, 模拟和实验结果表明, 窄带和宽带完全吸波超材料都可提高微带天线的定向性和增益, 性能得到了明显改善. 经过优化设计 S 波段超材料完全吸收基板微带天线的增益相比普通微带天线提高了 1.8 dB, 相当于有效辐射功率提高了 51%. 表明将完全吸波超材料作为天线的基板, 可以明显改善天线性能.

关键词: 树枝状结构, 微带天线, 完全吸波材料, 增益

PACS: 41.20.Jb

1. 引言

超材料 (metamaterial) 是一种新型人工结构材料, 可以实现诸如负折射和完美透镜等一系列奇异的电磁特性^[1]. 根据有效媒质理论^[2], 超材料的电磁特性可以用有效介电常数和有效磁导率来表示. 通过设计超材料的单元结构, 使其对电场和磁场产生相应的谐振, 从而可以方便地调控其有效介电常数和有效磁导率. 利用这个思想, 在微波段设计出了有效介电常数和有效磁导率同时为负的左手材料^[3]. 之前的研究一般都试图尽量减小超材料的损耗, 更好地体现其负磁导率或负折射率的特性. 但是, 超材料中的损耗也具有很多潜在的应用, 为此设计出了完全吸波超材料^[4], 很好地拓宽了人工超材料的应用前景.

完全吸波超材料, 是利用人工超材料谐振的本性, 通过结构设计可以调节其谐振频率附近的金属欧姆损耗以及介电损耗, 实现对入射电磁波的完全吸收^[4]. 这种吸波超材料具有吸收效率高, 结构简单, 体积小等优点. 因此近几年对其的研究成为科学与技术领域的焦点. 我们组设计了开口六边形双环结构单元模型^[5-8], 在此基础上提出一种二维各

向同性的树枝状结构单元模型^[9-11], 获得红外^[12]和光学频段^[13]左手超材料. 并基于此结构单元设计出了树枝状完全吸波超材料^[14]. 通过调整单元结构的几何尺寸, 可使吸波频段的位置在不同频率段调控. 基于此模型设计出了窄带^[14]与宽带吸波超材料^[15], 并将其应用在天线性能的改进上, 通过使吸波超材料的吸波频段与微带天线的工作频段重叠来改善天线性能.

本文针对普通微带天线辐射效率不高, 增益低等缺点, 提出了一种超材料完全吸收基板微带天线. 吸波超材料具有对入射电磁波的完全吸收特性, 将这个特性应用于微带天线可以有效地抑制微带天线工作时激发的表面波和馈电网络的寄生辐射, 从而提高辐射效率改善微带天线性能. 采用加载树枝状结构的方法^[16,17], 可应用在各种场合下的微带天线改造上, 并且采用印刷电路板制造工艺, 与微带天线一体成型.

2. 样品设计与制作

2.1. 完全吸波超材料的设计

基于树枝状的完全吸波超材料结构是由金属树枝结构单元、介质基板和金属薄膜组成. 当电磁

* 国家自然科学基金 (批准号: 50632030, 50872113) 和国防基础科研项目资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

波垂直入射到超材料表面时,金属树枝电谐振器会对电场感应产生电谐振,同时,金属树枝与金属薄膜在磁场作用下会感应出反平行电流,产生磁谐振.合理的设计超材料的结构参数,可以使电谐振和磁谐振在给定的频率重叠,分别吸收入射电磁波的电场和磁场能量,达到 100% 吸收的科学标准.

通过基于时域有限差分法的德国商用电磁仿真软件 CST Microwave Studio 反复优化确定结构参数.仿真得到 S 曲线图.其中 S_{11} 和 S_{21} 分别是反射和透射曲线.

定义反射率^[4] $R = |S_{11}|^2$,透射率^[4] $T = |S_{21}|^2$.

因此吸收率可表示为 $A = 1 - R - T = 1 - R = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$.

2.1.1. 窄带完全吸波超材料

在厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯介质基板两面按正方形晶格单元分别刻蚀出周期排列的金属树枝及方形金属膜,其树枝状结构的单元如图 1(a) 所示,尺寸为 $a = 4.1$ mm, $b = 2.6$ mm, $c = 2.1$ mm, $w = 0.5$ mm, $\theta = 45^\circ$,厚度 $t = 0.03$ mm. 方形晶格边长 $d = 43$ mm;背面方形金属薄膜大小为 35 mm \times 35 mm,与晶格边长差 $g = 8$ mm,其晶格如图 1(b) 所示.并通过 CST 软件模拟了当电磁波垂直于窄带完全吸波超材料入射时的反射曲线、透射曲线及吸收曲线,如图 2(a) 所示.窄带完全吸波超材料在频率

为 3.78 GHz 实现了完美吸收.

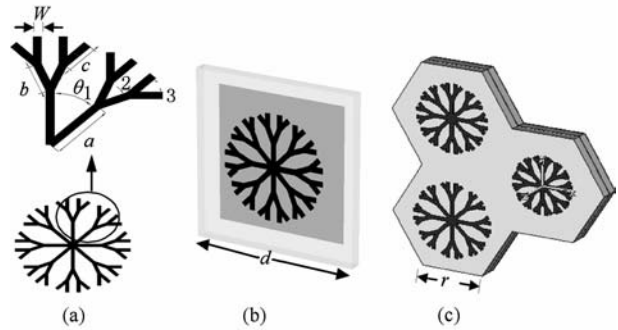


图 1 (a) 金属树枝结构参数图; (b) 窄带完全吸波超材料晶格图; (c) 宽带完全吸波超材料晶格图

2.1.2. 宽带完全吸波超材料

用电路板刻蚀技术,分别在两层厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯介质基板的顶层和中间层上刻蚀出六边形密集排布^[18]的金属树枝阵列单元,并且在底层镀一层金属薄膜.实验设计了三种树枝状结构单元,三级分支长度分别为 $a_1 = 4.3$ mm, $b_1 = 2.7$ mm, $c_1 = 2$ mm; $a_2 = 4.2$ mm, $b_2 = 2.8$ mm, $c_2 = 1.9$ mm; $a_3 = 4.1$ mm, $b_3 = 2.9$ mm, $c_3 = 2$ mm, $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 45^\circ$,线宽 $w = 0.6$ mm;树枝以及金属薄膜的厚度均为 0.03 mm,单元之间采用六边形排布,边长为 $r = 23$ mm,其晶格单元如图 1(c) 所示.因 $g = 0$ 金属薄膜完全覆盖结构单元底层,所以透射为零,并通过

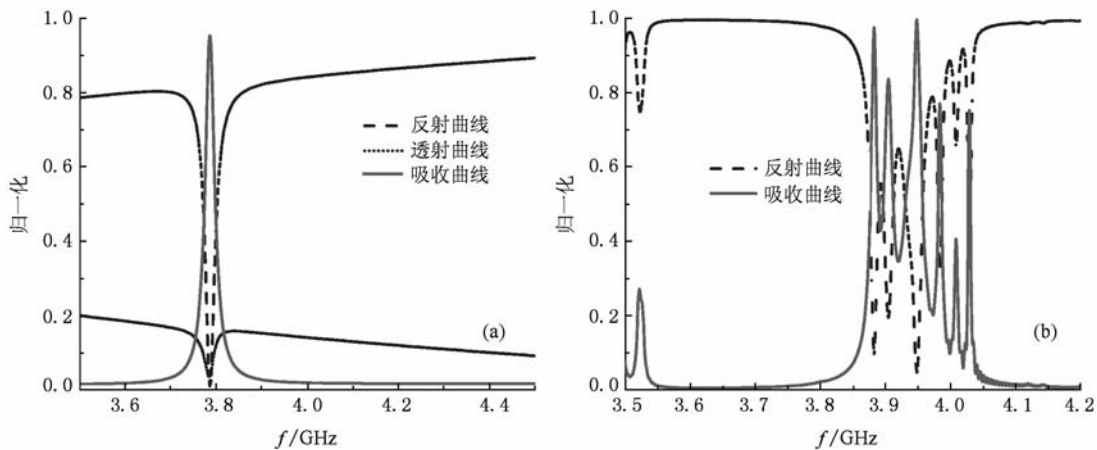


图 2 (a) 窄带完全吸波超材料的吸收效果图; (b) 宽带完全吸波超材料的吸收效果图

CST 软件模拟了当电磁波垂直于宽带完全吸波超材料入射时的反射曲线及吸收曲线,如图 2(b) 所示,宽带完全吸波超材料的中心频率为 3.85 GHz 到 4.05 GHz.

2.2. 超材料完全吸收基板微带天线

超材料完全吸收基板微带天线是在普通微带天线的辐射贴片和接地板周围的介质基板上加载

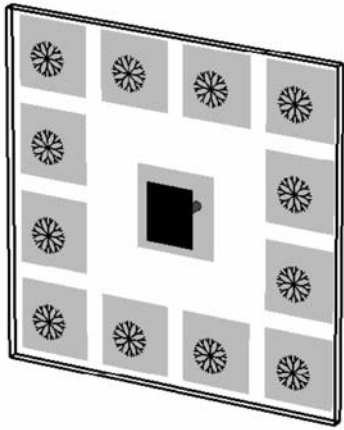


图3 超材料窄带完全吸收基板微带天线

树枝状结构完全吸波超材料. 利用窄带和宽带吸波

超材料对天线辐射方向的限制,减少天线副瓣,使天线方向性更集中,提高天线增益,改善天线的性能.

2.2.1. 超材料窄带完全吸收基板微带天线

在尺寸 $172\text{ mm} \times 172\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯介质基板 ($\epsilon = 2.65$) 两个侧面上,分别刻蚀出尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的金属接地板和尺寸为 $23.2\text{ mm} \times 23.2\text{ mm}$ 的金属辐射片. 天线的中心频率在 3.78 GHz . 通过在此微带天线的介质基板加载窄带完全吸波树枝状超材料结构,从而将其改造成为超材料完全吸收基板微带天线. 如图3所示,并用 CST 软件模拟了普通微带天线和超材料窄带完全吸收基板微带天线在频率为 3.78 GHz 的方向图. 如图4所示,图4(a)和(b)分别为 E 面和 H 面的方向图.

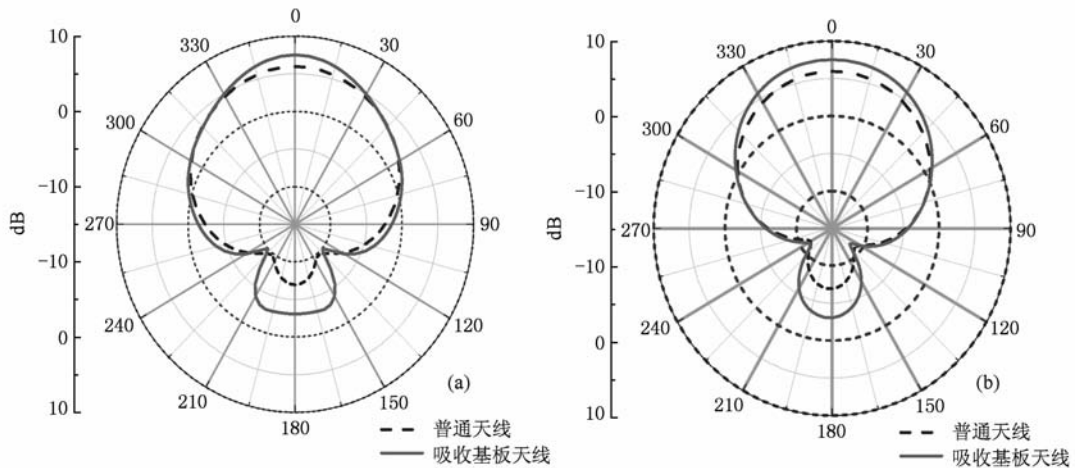


图4 (a) E面; (b)H面

2.2.2. 超材料宽带完全吸收基板微带天线

在尺寸 $249.5\text{ mm} \times 249.5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的聚四氟乙烯介质基板 ($\epsilon = 2.65$) 两个侧面上,分别刻蚀出尺寸为 $64\text{ mm} \times 64\text{ mm}$ 的金属接地板和尺寸为

$22.6\text{ mm} \times 26.4\text{ mm}$ 的辐射金属片. 天线的中心频率在 3.87 GHz . 在天线正、背面围绕辐射片、金属接地板的周围介质基板覆盖一层相同厚度、相同材料的介质板使其周围组成双层板,并加载宽带

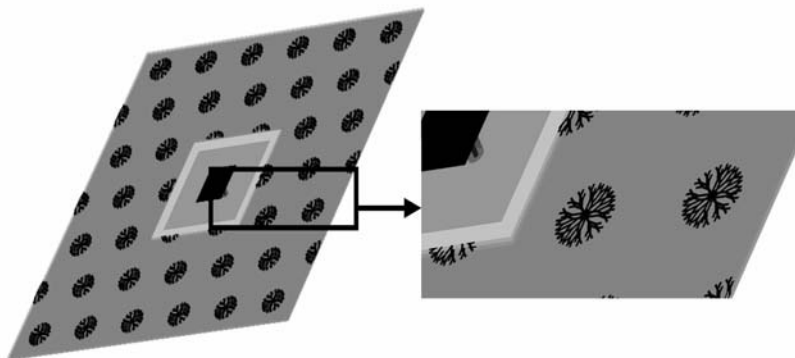


图5 超材料宽带完全吸收基板微带天线

完全吸波超材料单元,从而将其改造成超材料宽带完全吸收基板微带天线.如图5所示,并用CST软件模拟了普通微带天线和超材料窄带完全吸收

基板微带天线在频率为3.87 GHz的方向图.如图6所示,图6(a)和(b)分别为E面和H面的方向图.

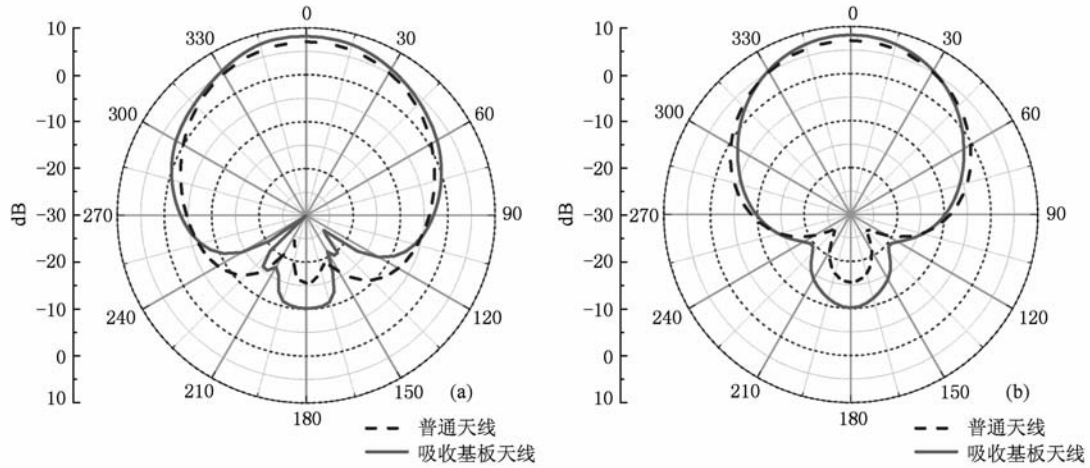


图6 (a) E面; (b)H面

3. 结果与讨论

采用电路板刻蚀技术制作天线,根据之前的模拟结果,在厚度为1 mm的聚四氟乙烯介质基板($\epsilon = 2.65$)上制作微带天线.用SMA同轴接头连接天线的贴片和接地板,超材料完全吸收基板微

带天线如图7所示:利用AV3618矢量网络分析仪观测了普通微带天线与超材料完全吸收基板微带天线的回波损耗曲线.超材料窄带完全吸收基板微带天线及其所参照的普通天线的中心工作频率为3.88 GHz,超材料宽带完全吸收基板微带天线及其所参照的普通天线的中心工作频率为4.02 GHz.

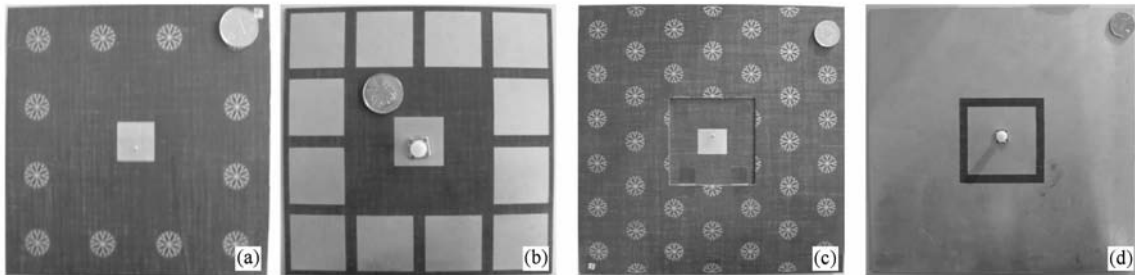


图7 (a),(b)分别是超材料窄带完全吸收基板微带天线的正面及背面;(c),(d)分别是超材料宽带完全吸收基板微带天线的正面及背面

表1 超材料吸收基板微带天线测量结果

样品	频率/GHz	3 dB角				增益/dBi	
		E面/(°)		H面/(°)		普通天线	吸收基板天线
		普通天线	吸收基板天线	普通天线	吸收基板天线		
1	3.88	92	79	89	66	5.8	7.6
2	4.02	86	69	72	64	6.9	8.01

用NSI2000天线测量系统测试了普通微带天线与超材料完全吸收基板微带天线中心工作频率的辐

射方向图,测量结果如表1所示,样品1和2分别对应的是超材料窄带完全吸收基板微带天线及其所参

照的普通天线和超材料宽带完全吸收基板微带天线及其所参照的普通天线. 图 8 为超材料窄带完全吸收基板微带天线及其所参照的普通天线的辐射方向图, 图 8(a) 和 (b) 分别为 E 面和 H 面的方向图. 从图中可以看出, 加载了完全吸波材料的微带天线相比普通天线, 其增益提高 1.8 dB; E 面和 H 面的功率波束宽度 (3 dB 角) 分别减小 13° 和 23°, 减弱了侧向辐射; 图 9 为超材料宽带完全吸收基板微带天线及其所参照普通天线的辐射方向图, 图 9 (a) 和 (b) 分别为 E 面和 H 面的方向图. 从图中可以看出, 相比普通天线,

其增益提高 1.1 dB; E 面和 H 面的半功率波束宽度分别减小 17° 和 8°, 减弱了侧向辐射.

从模拟结果和实验结果可知, 完全吸收材料可以更好的达到对表面波的吸收、抑制, 因此, 从其天线远场辐射表现出具有更好的方向性和更高的增益. 两组天线的中心频率都向高频移动, 两组天线的辐射方向图吻合得较好. 分析原因: 设计天线时基板的特定参数与实际基板存在微小误差, 使得天线及完美吸波材料都向高频移动, 但工作频率仍然重叠, 所以方向图符合得较好.

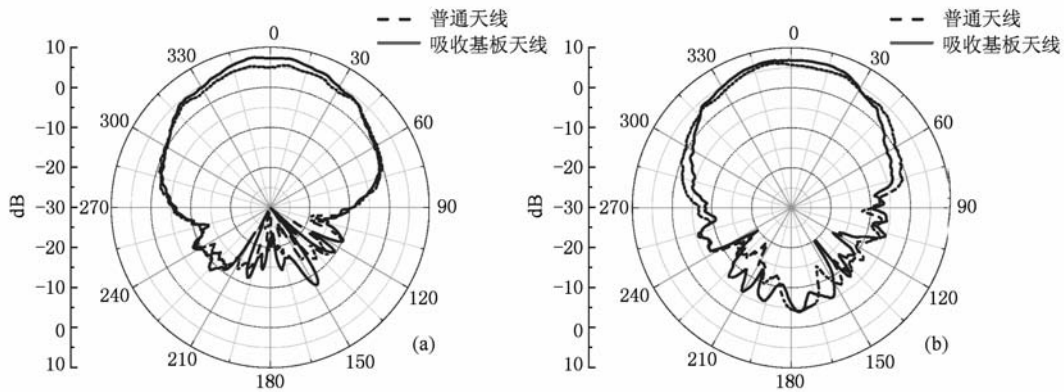


图 8 (a) E 面; (b) H 面

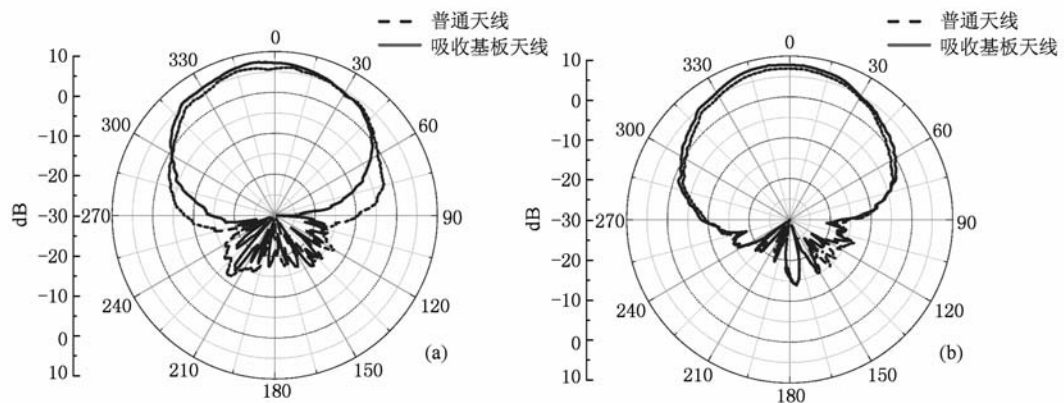


图 9 (a) E 面; (b) H 面

4. 结 论

本文设计了两种基于树枝状结构模型的完全吸波超材料——窄带完全吸波超材料和宽带完全吸波超材料, 并设计出了 S 波段超材料完全吸收基板微带天线, 实验结果表明, 相比普通微带天

线, 超材料完全吸收基板微带天线, 增益得到了提高, 增益最大提高了 1.8 dB; 半功率波束宽度也得到了很好的收缩, 最大收缩了 23°. 并且本文中利用宽带完全吸收超材料来改善天线性能, 为提高宽带微带天线的辐射效率提供了一条有效途径. 这种微带天线加工方便, 易成型, 在工程上有广阔的应用前景.

- [1] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [2] Smith D R, Pendry J B 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **23** 391
- [3] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [4] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, Smith D R, Padilla W J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 207402
- [5] Zhao Q, Zhao X P, Kang L, Zhang F L, Liu Y H, Luo C R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2206 (in Chinese) [赵乾、赵晓鹏、康雷、张富利、刘亚红、罗春荣 2004 物理学报 **53** 2206]
- [6] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330
- [7] Zhao X P, Zhao Q, Kang L, Song J, Fu Q H 2005 *Phys. Lett. A* **346** 87
- [8] Luo C R, Kang L, Zhao Q, Fu Q H, Song J, Zhao X P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1607 (in Chinese) [罗春荣、康雷、赵乾、付全红、宋娟、赵晓鹏 2005 物理学报 **54** 1607]
- [9] Zhou X, Fu Q H, Zhao J, Yang Y, Zhao X P 2006 *Opt. Exp.* **14** 7188
- [10] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [11] Zhou X, Zhao X P 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 181908
- [12] Liu H, Zhao X P, Yang Y, Li Q W, Lv J 2008 *Adv. Mater.* **20** 2050
- [13] Liu B Q, Zhao X P, Zhu W R, Luo W, Cheng X C 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 3523
- [14] Zhu W R, Zhao X P 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 2382
- [15] Bao S, Luo C R, Zhang Y P, Zhao X P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 261 (in Chinese) [保石、罗春荣、张燕萍、赵晓鹏 2010 物理学报 **59** 261]
- [16] Liu Y H, Zhao X P 2009 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **51** 1732
- [17] Liu Y H, Zhao X P 2008 *IET Microw. Antennas Propag.* **2** 737
- [18] Christopher M B, Tao H, Liu X L, Richard D A, Zhang X, Padilla W J 2008 *Opt. Exp.* **16** 18565

S-wave band microstrip antenna with perfect absorbing metamaterial substrate*

Bao Shi Luo Chun-Rong Zhao Xiao-Peng[†]

(Department of Applied Physics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(Received 27 January 2010; revised manuscript received 29 March 2010)

Abstract

Perfect absorbing metamaterial based on model of metallic dendritic cell is fabricated. A S-wave band microstrip antenna with perfect absorbing metamaterial substrate is proposed. The results show that compared to the conventional microstrip antenna, the performance of the novel microstrip antenna with perfect absorbing metamaterial substrate has improved remarkably. The direction of the antenna is enhanced, the gain is improved by 1.8dB and its efficiency is increased by 51%. It is proved that the performance of the microstrip antenna is improved by using perfect absorbing metamaterial as its substrate.

Keywords: dendritic structure, microstrip antenna, perfect absorbing metamaterial, gain

PACS: 41.20.Jb

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 50872113), and the Defense Basic Research Program of China.

[†] Corresponding author. E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn