

一种新型宽带定向性贴片天线设计

郭蓉 曹祥玉 袁子东 徐雪飞

Design of a novel wideband directivity patch antenna

Guo Rong Cao Xiang-Yu Yuan Zi-Dong Xu Xue-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 63, 244102 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.244102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2014/V63/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电大开孔箱体屏蔽效能分析解析模型

Formulation for shielding effectiveness analysis of a rectangular enclosure with an electrically large aperture

物理学报.2014, 63(23): 234101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.234101>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna

物理学报.2014, 63(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224102>

基于动理论模型的一维等离子体电磁波传输特性分析

Analysis of one-dimensional electromagnetic wave transmission characteristics of plasma based on a kinetic theory model

物理学报.2014, 63(21): 214101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214101>

缩比模型的宽频时域太赫兹雷达散射截面(RCS)研究

Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models

物理学报.2014, 63(21): 214102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214102>

一种新型宽带定向性贴片天线设计*

郭蓉 曹祥玉† 袁子东 徐雪飞

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2014年5月24日收到; 2014年6月28日收到修改稿)

利用超材料概念, 通过在接地面上蚀刻条形缝隙图案, 并引入“八木”天线中的反射器和引向器的设计思想, 设计并且制作了一种超宽带强定向型贴片天线. 仿真结果表明, 天线相对带宽为65.3% (6.9—13.6 GHz), 带内回波损耗均在-10 dB以下, 整个频段内天线的增益均在4.4 dBi以上. 由于接地板上蚀刻的超材料结构的左手特性影响了天线介质基底的等效媒质参数, 天线电磁场的传播方向被改变, 天线辐射场主要集中在水平方向而不是传统贴片天线的垂直方向. 在传统的贴片天线上引入反射器和引向器增强了天线的方向性. 实验结果与仿真结果有较好的一致性.

关键词: 超宽带, 强定向性, 贴片天线

PACS: 41.20.Jb, 73.63.-b

DOI: 10.7498/aps.63.244102

1 引言

微带贴片天线作为最常用的印刷天线之一, 具有剖面低、结构简单、成本低和易与飞行器共形的优点, 但其效率低、频带窄、增益低等缺点大大制约了其应用. 目前, 增加带宽的传统方法是采用厚基板的同时降低介质的介电常数, 采用多层结构, 附加阻抗匹配网络, 采用渐变结构等. 而超材料 (metamaterial) 的出现为克服传统天线缺点、设计宽带天线提供了新的技术手段.

在天线基板中全部或部分加载超材料, 利用其电磁带隙特性可以抑制基板上的表面波, 从而减小天线的后向辐射, 提高前向增益^[1-4]. 文献[5, 6]通过在贴片天线基底上加载互补开裂环 (complementary split-ring resonators, CSRRs) 影响基底的等效媒质参数减小了天线贴片尺寸, 同时带宽有稍微的改善, 但天线增益却有不同程度的下降. 文献[7]通过在天线贴片和接地板上蚀刻平面超材料图案提出了一种新颖的宽带高增益贴片天线设计. 文献[8]在文献[7]的基础上, 通过在天线贴片和接地面

上分别蚀刻周期互补开裂环和条形缝隙结构, 扩展了带宽, 同时具有较大的增益. 但由于其所采用的超材料结构是一种窄带高损耗结构, 限制了其带宽的展宽. 文献[9]采用蚀刻具有宽带低耗特点的周期互补三角形电磁谐振单元 (CTER) 和条形缝隙结构, 进一步展宽了带宽, 提高了增益. 文献[10]单纯使用条形缝隙结构, 带宽得到了极大的展宽, 并且天线辐射效率达到了96%, 但是这种形式的天线不具有定向性.

为了使设计的贴片天线具有宽带特性的同时具有一定的定向性, 本文采用辐射贴片接同轴馈线, 接地板上蚀刻条形缝隙结构, 同时引入“八木”天线中的反射器与引向器的设计思想, 设计了一种超宽带高增益强定向性贴片天线. 研究表明, 条状缝隙结构具有宽带低损耗的特点, 同时能提高天线增益^[11,12]; “八木”天线中的反射器和引向器可以使天线的辐射方向发生改变, 主要辐射方向沿着反射器指向引向器的方向^[13,14], 因此, 在传统贴片上应用引向器和反射器可以实现天线的定向性. 实验结果与仿真结果取得了很好的一致性.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61271100) 和陕西省自然科学基金项目 (批准号: 2012JM8003) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gjj9694@163.com

2 天线设计与分析

本文提出天线结构及其具体尺寸如图1(a), (b)和(c), 天线贴片为多边形结构, 左右两边的金属条分别为引向器和反射器, 接地板上蚀刻周期条形缝隙结构. 介质基底采用 Duroid5880, 相对介电常数 $\varepsilon_r = 2.2$, 厚度 $h = 1$ mm.

采用微带贴片天线的设计方法, 理论尺寸计算如下:

贴片的宽度 W 为

$$W = \frac{c}{2f_0} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中, c 表示光速, f_0 为天线工作的中心频率. 介质基板的相对有效介电常数 ε_{re} 为

$$\varepsilon_{re} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}}; \quad (2)$$

天线的边缘场引起的等效伸长长度

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_{re} + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_{re} - 0.258)(W/h + 0.8)}. \quad (3)$$

由此可以计算出矩形贴片的实际长度 L 为

$$L = \frac{c}{2f_0 \sqrt{\varepsilon_{re}}} - 2\Delta L. \quad (4)$$

通常接地板的长度 L_g 和宽度 W_g 只需满足以下两式:

$$L_g \geq L + 6h, \quad (5)$$

$$W_g \geq W + 6h. \quad (6)$$

根据上述公式得到天线的原始尺寸, 新天线对原始天线进行变形, 在接地板上蚀刻条状缝隙结构, 同时在贴片两边增加引向器和反射器. 贴片尺寸影响谐振频率和频段内的匹配. 条状缝隙图案是一种宽带低损耗的周期结构, 这种周期结构能够抑制表面波, 提高前向增益^[8,9]. 反射器和引向器的共同作用使得传统天线的辐射方向图发生改变.

仿真比较贴片长度 l_1 与宽度 w_1 、馈线渐变结构的宽度 w_2 变化时的天线 S_{11} 曲线, 分别如图2(a), (b), (c) 所示. 随着 l_1 由 5.2 mm 增加到 7.2 mm, 天线的低谐振频率由 9.9 GHz 降低到 6.8 GHz; w_1 由 1.6 mm 增加到 4.8 mm, 天线的 S_{11} 高频和低频谐振频率都逐渐降低, 同时谐振深度加深. 由此可知 l_1 主要影响天线的低频谐振频率, w_1 主要影响天线整体的谐振频率与谐振深度. 当馈线结构的宽度 $w_2 = 1.4$ mm 时, 天线的低频谐振频率较深;

$w_2 = 3.0$ mm 时, 天线的高频谐振部分较深. 馈线渐变结构的宽度 w_2 主要影响天线的谐振深度.

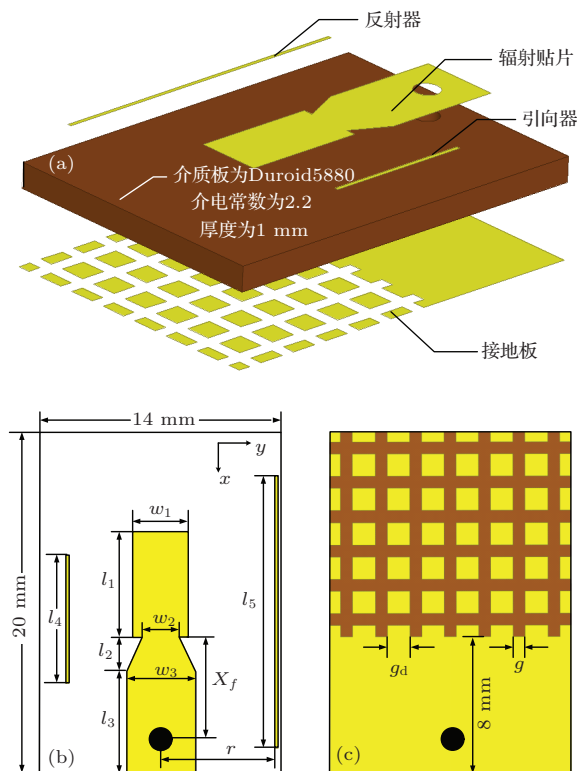
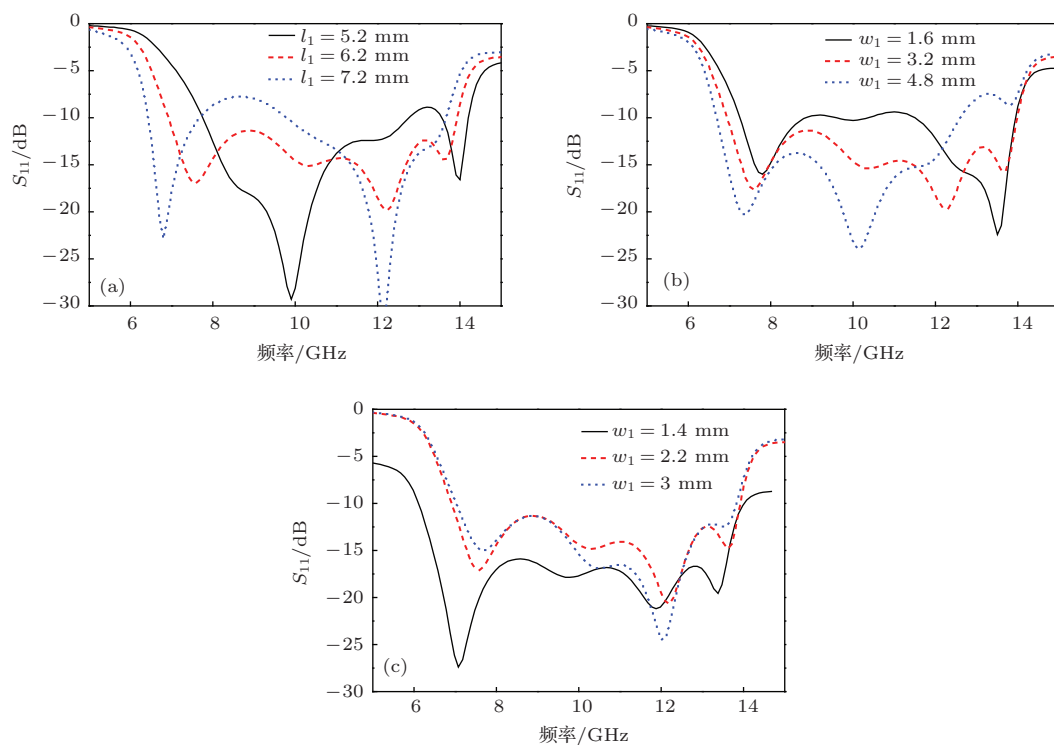


图1 天线结构图 (a) 三维视图; (b) 天线上表面; (c) 接地板

对原始的传统微带贴片天线和新天线进行仿真, 同时仿真比较接地板条状缝隙宽度 g 不同时的天线辐射性能, 天线的 S_{11} 如图3所示. 原始天线的 -10 dB 工作带宽为 11.8—12.3 GHz, 谐振中心频率约为 12.0 GHz, 相对带宽约为 4.1%. 缝隙宽度 g 为 0.4 mm 时, -10 dB 工作带宽为 6.9—12.8 GHz (是原始天线的 11.8 倍), g 为 0.7 mm 时, -10 dB 工作带宽为 7.0—13.9 GHz (是原始天线的 13.8 倍), g 为 1.0 mm 时, 10 dB 工作带宽为 7.1—14.0 GHz (是原始天线的 13.8 倍). 仿真结果表明, 条状缝隙结构具有宽带特性. 而缝隙宽度主要影响天线的阻抗匹配和工作带宽. 随着缝隙宽度由 0.4 mm 增加到 1.0 mm, 天线高频部分匹配逐渐变好, 低频部分匹配逐渐变差.

仿真比较有无反射器和引向器两种情况下天线的辐射性能. 图4所示为天线在 8, 10 和 12 GHz 时的二维方向图. 可以看出天线的辐射方向图发生变化, 主要辐射方向变为 $-y$ 方向, 说明反射器与引向器起到了定向性的作用.

图2 (网刊彩色) 结构参数的优化 (a) 贴片长度 l_1 ; (b) 贴片宽度 w_1 ; (c) 馈线渐变结构的宽度 w_2

研究反射器与贴片距离对天线辐射方向图的影响, 调节反射器与贴片的距离 r 为 2.6, 4.6 和 6.6 mm, 图 5 所示为天线在 10 GHz 时的二维方向图. 可以看出, 随着反射器与辐射贴片的距离增大, 天线的定向性越明显. 所以反射器要与辐射贴片保持适当的距离.

研究反射器长度对天线方向图的影响, 调节反射器的长度 l_5 为 4, 8, 12 和 16 mm, 图 6 所示为天线在 10 GHz 时的二维和三维方向图. 可以看出随着反射器长度的增大, 天线的辐射方向逐渐由全向变为 $-y$ 方向. 反射器长度要达到一定的值, 才能

体现其定向性的作用.

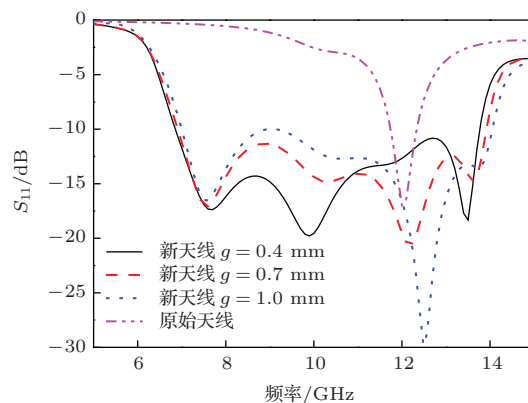
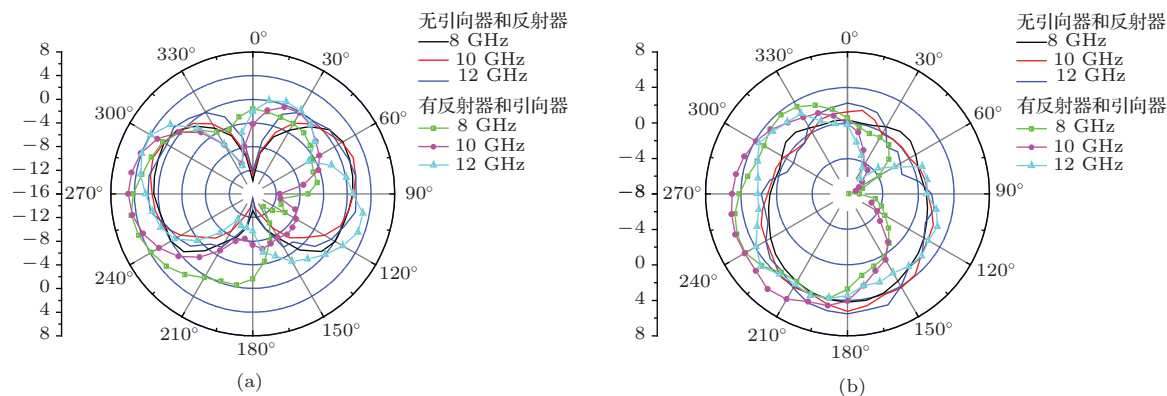
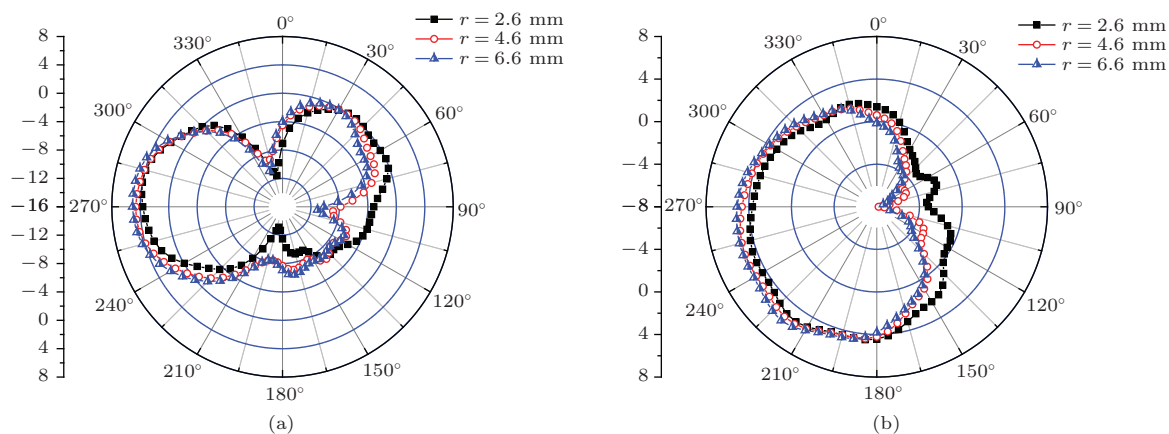
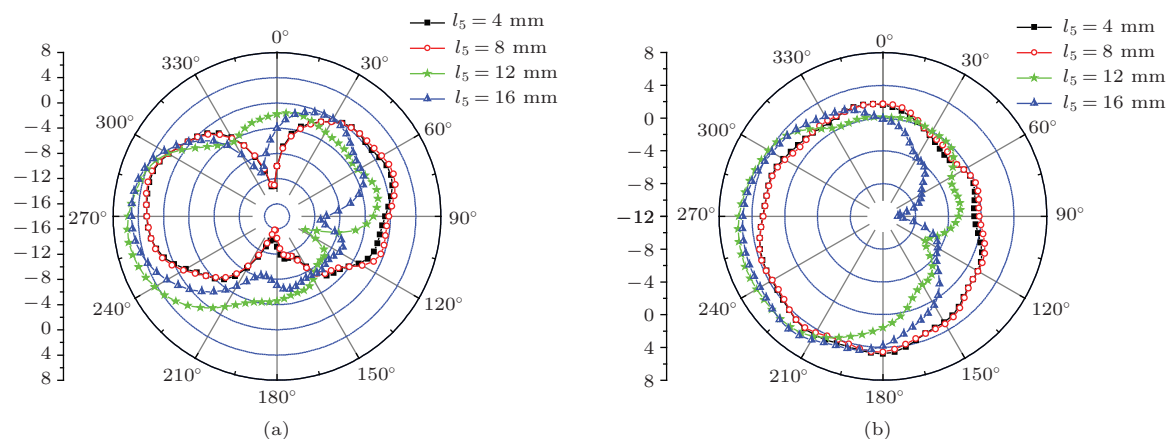


图3 (网刊彩色) 原始天线和新天线的比较

图4 (网刊彩色) 有无反射器和引向器时的辐射方向图 (a) xoy 面; (b) $yozy$ 面

图5 (网刊彩色) 反射器与贴片距离 r 不同时的辐射方向图 (a) xoy 面; (b) $yo z$ 面图6 (网刊彩色) 反射器长度 l_5 不同时的辐射方向图 (a) xoy 面; (b) $yo z$ 面

3 仿真与实验

使用有限元仿真软件HFSS13.0对天线进行仿真优化, 得到天线整体尺寸为 $w_1 = 3.2$ mm, $w_2 = 2.2$ mm, $w_3 = 4$ mm, $l_1 = 6.2$ mm, $l_2 = 2$ mm, $l_3 = 6$ mm, $l_4 = 7.5$ mm, $l_5 = 16$ mm, $X_f = 6.5$ mm, $r = 6.6$ mm. 仿真结果表明, 以回波损耗 -10 dB为标准, 天线的相对带宽为65.3% (6.9—13.6 GHz). 为了证实仿真分析结果, 加工了天线实物(如图7), 并用Agilent N5230C矢量网络分析仪测试, 图8为 S_{11} 仿真和测试结果, 二者 -10 dB工作带宽基本一致.

由于引向器和反射器以及条形缝隙的共同作用, 新天线最大辐射方向在水平方向. 为了证实天线的这一特性, 在工作带宽内选取了9, 11 GHz两个频点, 给出了其三维和二维归一化辐射方向图, 如图9所示. 从方向图中可以看到, 天线辐射能量主要集中在水平 $-y$ 方向. 这主要是因为接地板上

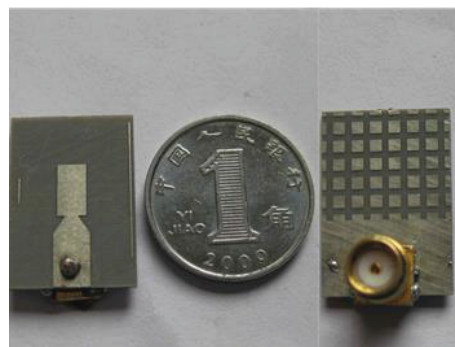
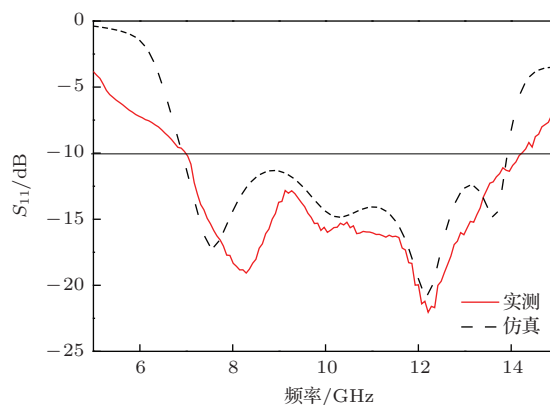


图7 加工的天线照片

图8 (网刊彩色) S_{11} 仿真和实测结果

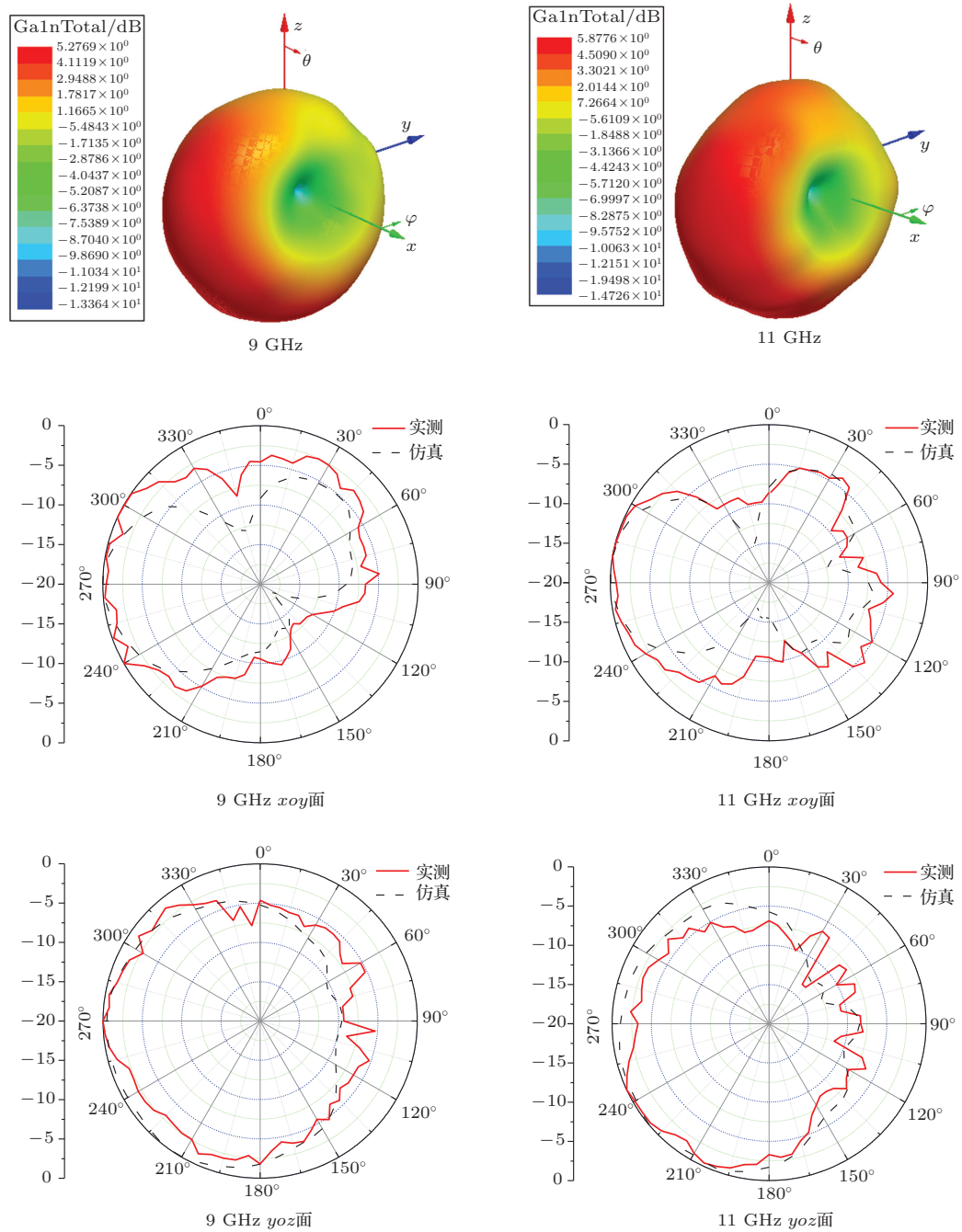


图9 (网刊彩色) 天线三维和二维辐射方向图

蚀刻的条形缝隙结构影响了天线介质基底的等效媒质参数, 天线电磁场的传播方向被改变, 天线辐射场主要集中在水平方向而不是传统贴片天线的垂直方向.

根据文献[8], 在接地板上蚀刻超材料结构后, 天线的带宽会展宽. 一般微带天线带宽展宽伴随天线增益的降低, 但本结构形式的天线增益在整个带宽内仍保持了较高的增益, 如图10所示. 天线在6.9—13.6 GHz频带范围内的增益都在4.4 dBi以上, 最大增益达5.9 dBi.

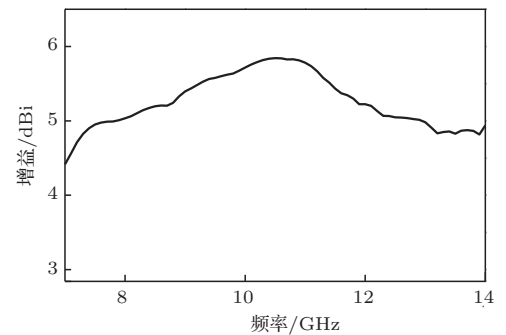


图10 天线增益

4 结 论

本文设计了一种新型天线, 采用辐射贴片接同轴馈线的方式, 通过引入“八木”天线中引向器和反射器来实现天线强定向性, 同时在接地板上蚀刻具有宽带低耗特点的条形缝隙结构. 以回波损耗 -10 dB为标准, 天线的相对带宽为65.3% (6.9—13.6 GHz), 是原始天线带宽(11.8—12.3 GHz, 相对带宽为4.1%)的13.8倍, 增益大于4.4 dBi, 且主要辐射方向在天线的水平方向. 并且由于反射器和引向器的共同作用, 天线的辐射方向沿着反射器指向引向器的方向偏移, 实现了天线的定向性.

参考文献

- [1] Ziolkowski R W, Kipple A D 2003 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **51** 2626
- [2] Abedin M F, Ali M 2005 *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.* **4** 274
- [3] Bao S, Luo C R, Zhao X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014101 (in Chinese) [保石, 罗春荣, 赵晓鹏 2011 物理学报 **60** 014101]
- [4] Zhao Y, Cao X Y, Zhang D, Yao X, Li S J, Yang H H, Li W Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034101 (in Chinese) [赵一, 曹祥玉, 张迪, 姚旭, 李思佳, 杨欢欢, 李文强 2014 物理学报 **63** 034101]
- [5] Aparna U L 2006 *Ph. D. Dissertation* (New York: Kate Gleason College Engineering (KGCOE) Rochester Institute of Technology Rochester)
- [6] Lee Y, Hao Y 2008 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **50** 2131
- [7] Li L W, Li Y N, Yeo T S, Mosig J R, Martin O J F 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 164101
- [8] Liu T, Cao X Y, Jun Gao, Yang Q, Li W Q 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 2858
- [9] Liu T, Cao X Y, Gao J, Yang Q, Li W Q 2012 *Chin. J. Radio Sci.* **27** 576 (in Chinese) [刘涛, 曹祥玉, 高军, 杨群, 李文强 2012 电波科学学报 **27** 576]
- [10] Wang L, Li L W 2012 *Proceeding of ISAP2012* Nagoya, Japan, Oatober 29-November 2, 2012 p806
- [11] Gong Q, Zhang S, Gong S X, Jiao Y C, Lu B 2012 *J. Xidian Univ.* **39** 120 (in Chinese) [龚琦, 张帅, 龚书喜, 焦永昌, 路宝 2012 西安电子科技大学学报 **39** 120]
- [12] Chen S B, Wen J H, Wang G, Wen X S 2013 *Chin. Phys. B* **22** 074301
- [13] Ni G Q, Zhang T, Ni W, Li S B 2013 *J. Microw.* **29** 51 (in Chinese) [倪国旗, 张涛, 倪围, 李树彬 2013 微波学报 **29** 51]
- [14] Chen P, Yang X D, Chen C Y, Yang G S, Zhu X M 2014 *J. Microw.* **30** 34 (in Chinese) [陈彭, 杨晓东, 陈朝阳, 杨光松, 朱晓明 2014 微波学报 **30** 34]

Design of a novel wideband directivity patch antenna*

Guo Rong Cao Xiang-Yu[†] Yuan Zi-Dong Xu Xue-Fei

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 24 May 2014; revised manuscript received 28 June 2014)

Abstract

A wideband strong-directivity patch antenna is designed based on the metamaterial concept on the ground plane and the Yagi antenna concept of reflector and director. Due to the fact that the effective medium parameters of substrate of antenna are affected by the left-hand characteristics, the wave propagation direction of antenna is changed, which induces the strongest radiation in horizontal direction rather than the vertical direction of the conventional patch antenna. The reflector and director induce a directivity of the radiation. The simulation results show that the relative bandwidth of the designed antenna is 65.3% (6.9–13.6 GHz), the return loss is less than -10 dB, and the average gain is over 4.4 dBi in the operating range. Experimental results are in good agreement with the simulation results.

Keywords: ultra-broadband, strong-directivity, patch antenna**PACS:** 41.20.Jb, 73.63.-b**DOI:** 10.7498/aps.63.244102

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271100) and the Natural Science Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2012JM8003).

[†] Corresponding author. E-mail: gjg9694@163.com