

# 一种小型化宽波束的零阶谐振贴片天线设计

张呈辉, 曹祥玉\*, 高军, 李文强, 赵一

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 提出了一种小型化宽波束的零阶谐振贴片天线。该天线通过在圆形微带贴片天线四周中心对称的加载蘑菇型零阶谐振结构, 将圆形贴片激励的  $TM_{01}$  模和蘑菇型贴片激励的 ZOR 模叠加, 在实现天线小型化的同时展宽了天线的波束。仿真结果表明: 设计天线中心频点处的 E 面和 H 面半功率波瓣宽度分别为  $114.7^\circ$  和  $144.7^\circ$ , 与原始圆形微带贴片天线相比, 新天线 E 面和 H 面的半功率波瓣宽度分别展宽了 66.5% 和 60.1%, 谐振频点从 14.04 GHz 降至 7.32 GHz, 电尺寸由  $1.9\lambda \times 1.9\lambda \times 0.1\lambda$  缩减至  $0.9\lambda \times 0.9\lambda \times 0.01\lambda$ , 实现了 52.1% 的小型化效果, 仿真和实测结果取得了一致, 验证了设计的正确性。

**关键词** 微带天线; 零阶谐振器; 宽波束; 小型化

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.014

**中图分类号** TN929.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0056-05

## A Design of A Miniaturized Zeroth-order Resonance Patch Antenna with Broad Beam Width

ZHANG Cheng-hui, CAO Xiang-yu, GAO Jun, LI Wen-qiang, ZHAO Yi

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

**Abstract:** In this paper, a novel miniaturized Zeroth order Resonance (ZOR) patch antenna with broad beam width is presented. By inserting a centre-symmetric zeroth order resonance structure around circular micro-strip patch antenna combined the  $TM_{01}$  mode and ZOR mode induced by the circular patch and mushroom patch respectively, miniaturization and broadened beam width are realized simultaneously. The half power beam width of E plane and H plane are  $114.7^\circ$  and  $144.7^\circ$  respectively, compared with the original micro-strip antenna, the E plane and H plane HPBW of the new antenna is greatly broadened by 66.5% and 60.1%. Meanwhile, the resonant frequency is shifted from 14.04 GHz to 7.32 GHz, and the electric size is reduced from  $1.9\lambda \times 1.9\lambda \times 0.1\lambda$  to  $0.9\lambda \times 0.9\lambda \times 0.01\lambda$  to realize 52.1% miniaturization. Finally, the measurements show good agreement with the simulated one, which validates the correctness of the design.

**Key words:** micro-strip antenna; ZOR resonance; wide beam; miniaturization

当前,随着现代通信技术的快速发展,卫星导航定位系统在日常生活及军事通信中的作用日趋重要。我国的北斗定位系统、GPS、测控系统的飞行器载天线都要求天线在上半空间具有近似一致的响应

并且具有相对较高的低仰角增益<sup>[1]</sup>。微带贴片天线由于其具有低剖面、重量轻和易于加工等特点在卫星通信系统中得到了广泛地应用<sup>[2]</sup>。常规的矩形微带贴片天线其 E 面和 H 面的辐射方向图半功率波

收稿日期:2014-01-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271100)

作者简介:张呈辉(1989—),男,陕西富平人,硕士生,主要从事宽带、宽波束微带天线研究.E-mail:Michael\_lzu@126.com

\*通信作者:曹祥玉(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事天线与电磁兼容,电磁超材料,电磁学等研究.E-mail:gjgj9694@163.com

引用格式:张呈辉,曹祥玉,高军,等.一种小型化宽波束的零阶谐振贴片天线设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(4):56-60. ZHANG Chenghui, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al. A design of a miniaturized zeroth-order resonance patch antenna with broad beam width [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 56-60.

瓣宽度相对较窄<sup>[2]</sup>,因此寻求和设计出具有较宽波束和相对较高的低仰角增益的微带天线是目前研究的热点。为了展览天线的波束宽度,许多新技术被不断提出。如有三维方形底板的常规圆极化贴片天线,其波束宽度可达113°,但该天线高度达0.45λ<sup>[3]</sup>;应用锥形底板和部分闭合的平面电壁天线,其波束宽度可达130°,天线厚度为0.12λ,但该天线增益较低,仅为-0.6 dBi<sup>[4]</sup>;利用加载金属柱的双层介质圆形开缝贴片天线,其E面和H面的3 dB波束宽度均可达到±60°,但结构复杂,不易加工<sup>[5]</sup>;微带介质天线3 dB波束宽度可达到180°以上,低仰角增益大于0.5 dBi<sup>[6]</sup>,但该天线的接地板太小,在组阵的过程中后瓣过大。2013年Seung-Tae Ko提出了一种零阶谐振的组合贴片天线,该天线采用双贴片单馈点结构实现了E面波束的展览<sup>[7]</sup>,但H面波束较窄。

本文通过在常规圆形贴片天线四周加载蘑菇型零阶谐振贴片,设计了一种新颖的中心对称结构的小型化宽波束微带贴片天线,该天线E面和H面3 dB波束宽度同时得到极大展览,相比于原始微带贴片天线,E面H面分别展览至114.7°和144.7°,并且实现了52.1%的小型化效果。

### 1 理论分析

传统的传输线是由一个级联电感和一个并联电容的组合单元级联而成的,称为右手传输线,左手传输线则是由一个级联电容和一个并联电感的组合单元级联而成,将纯右手电路模型和纯左手电路模型结合起来就构成了复合左右手传输线的基本电路模型,见图1。

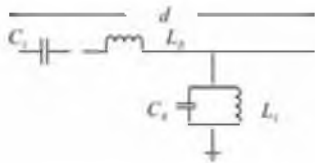


图1 复合左右手传输线结构  
Fig.1 Composit left/right handed transimission line

复合左右手传输线结构的谐振器的谐振频率发生在谐振器的物理长度为半波长的整数倍时,如下式所示,当电长度为0时,即为零阶:

$$l = |m| \frac{\lambda}{2} \tag{1}$$

$$\theta_m = \beta_m l = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{m\lambda}{2}\right) = m\pi, m=0, \pm 1, \dots \tag{2}$$

谐振模式<sup>[8]</sup>在谐振器的各个位置的电场分布式完全一样,并且该模式与谐振器的物理长度无关<sup>[9]</sup>。

### 2 天线设计与分析

#### 2.1 天线结构设计

本文在圆形微带贴片天线的四周加载零阶谐振结构,通过将圆形贴片激励的TM<sub>01</sub>模和矩形贴片激励的ZOR(Zeroth-Order Resonance, ZOR)模进行叠加,达到展览辐射方向图的效果。天线结构图见图2,天线采用单层介质结构,介质基底为相对介电常数ε<sub>r</sub>=2.65,损耗角正切tanδ=0.001,厚度h=2 mm的聚四氟乙烯介质板。天线尺寸为40 mm×40 mm,圆形贴片的半径为R=3.5 mm,贴片尺寸为L<sub>p</sub>=3.4 mm, W<sub>p</sub>=4.6 mm,缝隙宽度g=0.4 mm。

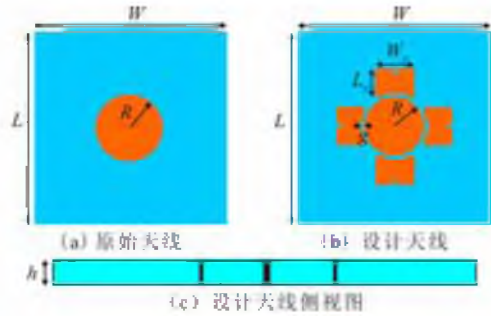


图2 天线结构图

Fig.2 Configuration of antenna

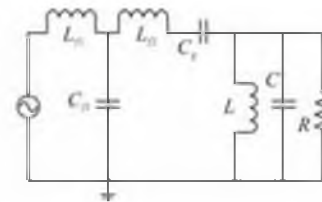


图3 等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of ZOR antenna

天线的等效电路图见图3。矩形贴片通过金属通孔和接地板相连,圆形贴片与矩形贴片之间缝宽为g,圆形贴片由同轴探针进行馈电,激励TM<sub>01</sub>模,矩形贴片和圆形贴片构成蘑菇型结构,这种结构构造出复合左右手传输线结构,通过缝隙耦合激励起零阶谐振模,将TM<sub>01</sub>模的方向图和ZOR模的方向图进行叠加,达到展览波束的目的,其中C<sub>g</sub>为缝隙电容,矩形贴片和金属通孔分别感应出电容C和电感L,圆形贴片对地电容为C<sub>f</sub>,其表面寄生电流构成电感L<sub>f2</sub>,同轴探针感应电感为L<sub>f1</sub>。由f=1/2π√LC可知,当等效电感和等效电容增大时,谐振频点降低,因此,可以通过改变缝隙宽度、贴片大小以及通孔的参数实现天线的小型化。

#### 2.2 仿真与试验

使用电磁仿真软件 Ansoft HFSS14.0 对天线

进行了仿真。 $S_{11}$ 曲线见图4,相比于原始天线,设计天线的谐振频点从14.04 GHz降至7.32 GHz,电尺寸由 $1.9\lambda \times 1.9\lambda \times 0.1\lambda$ 缩减至 $0.9\lambda \times 0.9\lambda \times 0.01\lambda$ ,实现了52.1%的小型化效果。图5给出中心频点以及上下边频的方向图图中天线的增益达到4.62 dB,对于宽波束天线来说,有了很大提高,且方向图在整个频段内的一致性较好。但H面的主极化和交叉极化的辐射功率几乎相等,这是因为圆形贴片的 $TM_{01}$ 模在H面具有沿 $\varphi$ 方向的主极化,而蘑菇型结构的ZOR模在E面和H面都具有相同的主极化,2种模式在H面整合时由于极化正交造成H面的交叉极化远远大于E面。

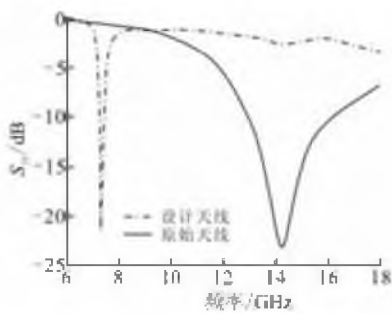


图4  $S_{11}$ 曲线

Fig. 4  $S_{11}$  graph

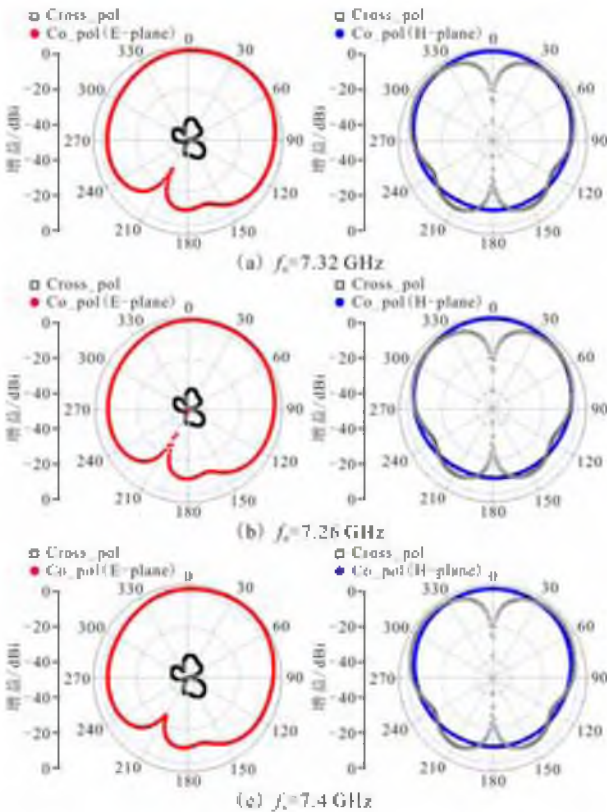


图5 天线二维方向图

Fig. 5 Pattern of the designed antenna at different frequencies

图6给出了设计天线和原始天线E面和H面方

向图对比图。从图中可以看出,相对原始天线,半功率波束宽度得到了极大地展宽,E面的半功率波束宽度由 $68.9^\circ$ 展宽至 $114.7^\circ$ ,展宽了66.5%,H面的半功率波束宽度由 $90.4^\circ$ 展宽至 $144.7^\circ$ ,展宽了60.1%。

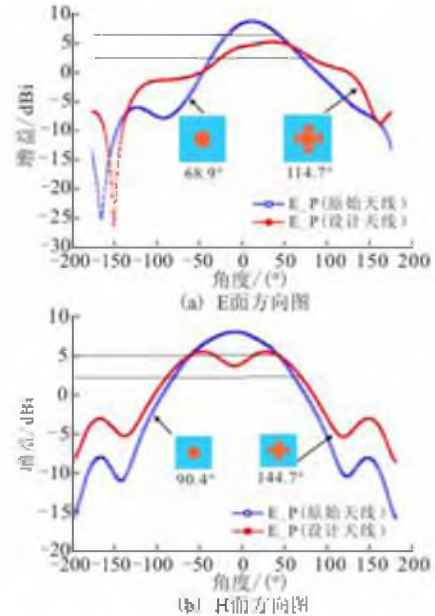
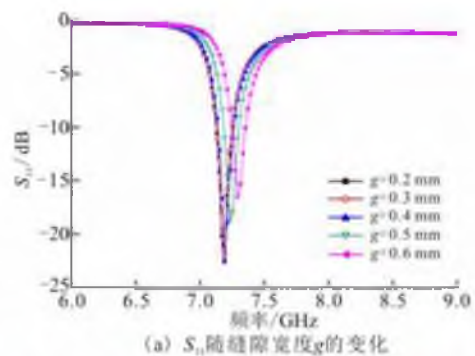


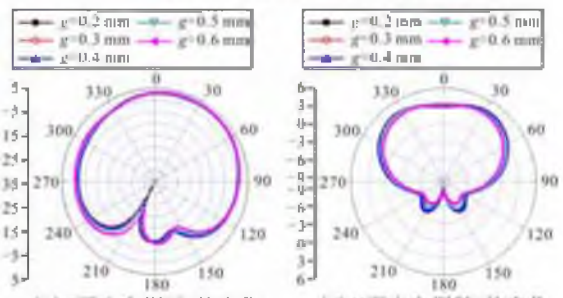
图6 设计天线和原始天线在中心频点的方向图

Fig. 6 The pattern of the designed and original antenna

为了在实现天线小型化的同时又不影响其辐射方向图,保持其他参数不变情况下,分别对缝隙宽度 $g$ 、贴片的长度 $L_p$ 、宽度 $W_p$ 以及金属通孔半径 $R_o$ 进行参数扫描优化分析,各参数对天性能的影响分别见图7~图10。



(a)  $S_{11}$ 随缝隙宽度 $g$ 的变化



(b) E面方向图随 $g$ 的变化

(c) H面方向图随 $g$ 的变化

图7 缝隙宽度 $g$ 对天线性能的影响

Fig. 7 The interference to antenna by the gap width

1) 缝隙宽度 $g$ 。随着 $g$ 的增大,谐振频点向高



频偏移,并且匹配特性变差,同时 E 面和 H 面的半功率波束宽度都有所展宽,为了兼顾谐振特性和辐射特性,选择  $g=0.4\text{ mm}$ 。

2)贴片长度  $L_p$  和宽度  $W_p$ 。为了更加清晰地显示各个参数对辐射性能的影响,表 1 和表 2 给出了  $L_p$ 、 $W_p$  取不同值时天线的工作频点和半功率波瓣宽度。

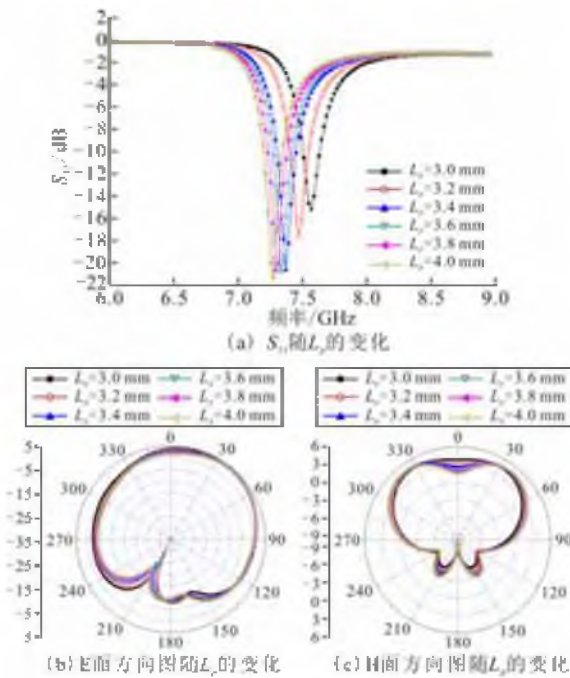


图 8 矩形贴片长度  $L_p$  对天线性能的影响  
Fig. 8 The interference to antenna by  $L_p$

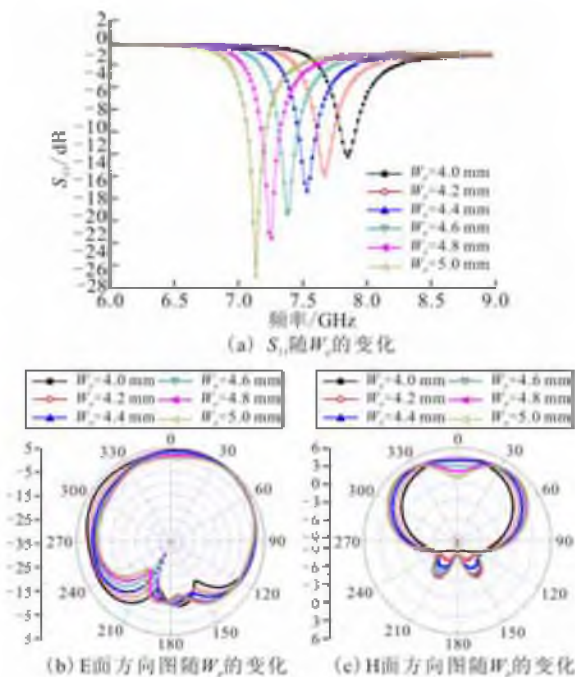


图 9 矩形贴片长度  $W_p$  对天线性能的影响  
Fig. 9 The interference to antenna by  $W_p$

表 1  $L_p$  对天线性能的影响

Tab. 1 Characteristics of the antenna vs  $L_p$

$L_p/\text{mm}$	$f_0/\text{GHz}$	E-plane/ $^\circ$	H-plane/ $^\circ$
3.0	7.58	110.3	141.9
3.2	7.48	107.4	147.3
3.4	7.38	102.6	147.3
3.6	7.34	99.7	148.5
3.8	7.30	95.4	150.1
4.0	7.28	90.3	69.4

表 2  $W_p$  对天线性能的影响

Tab. 2 Characteristics of the antenna vs  $W_p$

$W_p/\text{mm}$	$f_0/\text{GHz}$	E-plane/ $^\circ$	H-plane/ $^\circ$
4.0	7.86	17.4	132.3
4.2	7.68	148.1	137.6
4.4	7.54	115.8	141.7
4.6	7.38	107.3	146.2
4.8	7.26	100.9	149.2
5.0	7.14	77.1	66.4

由图 8 和表 1 可以看出,随着  $L_p$  的增大,谐振频点向低频偏移,E 面半功率波束宽度减小,当  $L_p \leq 3.8\text{ mm}$  时,H 面半功率波束宽度随着  $L_p$  的增大而增大,当  $L_p$  超过  $3.8\text{ mm}$  时,H 面方向图急剧缩减,这是由于 ZOR 模和  $\text{TM}_{01}$  模的谐振频点发生偏移,ZOR 模的方向图和  $\text{TM}_{01}$  模的方向图未在同一谐振频点处叠加,导致综合方向图波束宽度缩减。由图 9 和表 2 可得, $W_p$  对天线特性的影响和  $L_p$  相同,为了同时得到较宽的 E 面和 H 面方向图特性,选择  $L_p=3.4\text{ mm}$ ,  $W_p=4.6\text{ mm}$ 。

3)金属通孔半径  $R_v$ 。通过仿真分析发现,通孔距离圆形贴片距离越远,谐振特性越好,确定通孔圆心到原点距离为  $6.3\text{ mm}$ 。对通孔的半径  $R_v$  进行参数扫描见图 10。

随着通孔半径的增加,谐振频点向高频偏移且天线的匹配性能变差,这是由于等效电感  $L$  减小所导致的,但 E 面和 H 面的方向图都有所展宽,取  $R_v=0.3\text{ mm}$ 。

根据以上分析,选取最佳天线尺寸进行实物加工,天线实物见图 11。

用 Agilent N5230C 矢量网络分析仪对天进行测试  $S_{11}$ ,测试结果见图 12。从图 12 中可以看出,仿真与测试结果有较好的一致性,由于加工误差以及测试环境的影响导致谐振频点略向低频偏移,但整体趋势一致,E 面和 H 面的测试方向图和仿真结果吻合较好,验证了方法的正确性。

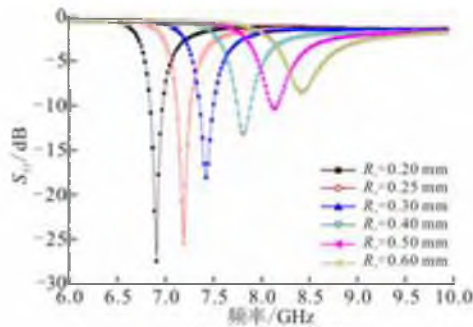
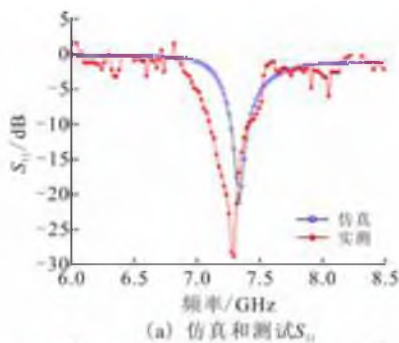
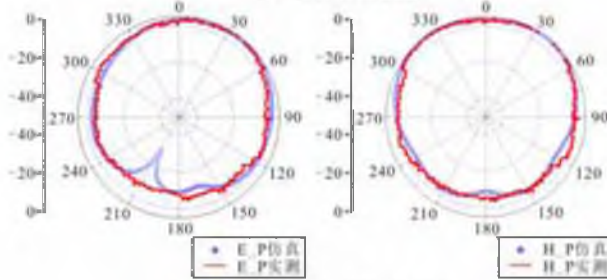
图10 通孔半径  $R$  对天线性能的影响

图11 天线实物图

Fig. 11 Photograph of fabricated antenna

(a) 仿真和测试  $S_{11}$ 

(b) 仿真和测试辐射方向图

图12 测试结果

Fig. 12 Measured results

### 3 结语

本文介绍了一种小型化、宽波束贴片天线,通过在常规圆形微带贴片天线四周加载零阶谐振结构,极大展现了天线的半功率波束宽度,同时实现了超过 52.1% 的小型化效果。仿真结果表明,新型天线的 E 面和 H 面波束宽度分别达到  $114.7^\circ$  和  $144.7^\circ$ ,谐振频点从 14.04 GHz 降至 7.32 GHz,小型化效果明显。该研究成果对小型化宽波束天线的设计具有

很好的借鉴意义。

### 参考文献(References):

- [1] Sun Houjun, Shi Lei, Li Jingtao. A compact broadband circularly polarized composite antenna with wide beamwidth[J]. Microwave and optical technology letters, 2008, 50(11): 2973-2975.
- [2] 郭蓉,曹祥玉,李思佳,等.P 波段小型化锯齿缝隙超宽带天线设计[J].空军工程大学学报:自然科学版, 2014, 15(2): 66-70.
- GUO Rong, CAO Xiangyu, LI Sijia, et al. A design of P-band miniaturized saw-tooth-edged ultra-wideband antenna[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(2): 66-70. (in Chinese)
- [3] 李洪彬,丁卫平,余同彬,等.实现宽波束圆极化天线的几种方法[J].军事通信技术, 2011, 32(1): 44-46.
- LI Hongbin, DING Weiping, YU Tongbin, et al. Techniques for wide-beam circularly polarized antennas[J]. Journal of military communications technology, 2011, 32(1): 44-46. (in Chinese)
- [4] Tang C L, Chiou J Y, Wong K L. Beamwidth enhancement of circularly polarized microstrip antenna mounted on a three-dimensional ground structure[J]. Microwave and optical technology letters, 2002, 31(1): 149-153.
- [5] Su C W, Huang S K, Lee C H. CP microstrip antenna with wide beamwidth for GPS band application[J]. Electronics letters, 2007, 43(20): 1062-1063.
- [6] Duan Z S, Qu S B, Wu Y, et al. Wide bandwidth and broad beamwidth microstrip patch antenna[J]. Electronics letters, 2009, 45(5): 249-250.
- [7] Haidan He. A novel wide beam circular polarization antenna- microstrip- dielectric antenna[C]//ICMMT 2002. [S.l.]: IEEE press, 2002: 381-384.
- [8] Ko Seung-Tae, Lee Jeong-Hae. Hybrid zeroth-order resonance patch antenna with broad E-plane beamwidth[J]. IEEE trans on antennas and propag, 2013, 61(1): 19-25.
- [9] 杨涛. 基于符合左右手传输线结构的小型化微波无源元件研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- YANG Tao. The study of miniaturized microwave passive components based on the composite right/left handed transmission line structure[D]. Chengdu: University of electronic science and technology of China, 2011. (in Chinese)
- [10] Anthony Lai, Leong K M K H, Tatsuo Itoh. Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation pattern based on periodic structures[J]. IEEE trans on antennas and propag, 2007, 55(3): 868-876.

(编辑:徐楠楠)