

一种高增益强定向波导缝隙天线

郑月军, 高军*, 曹祥玉, 袁子东, 李文强

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 设计并制备了一种在 5.42~5.80 GHz 频带内反射系数相位曲线斜率为正(一般为负)、幅度模值均在 0.83 以上、具有部分反射特性的双屏频率选择表面,并将该 FSS 以覆层的形式加载到波导缝隙天线辐射方向上,使其具有更宽的带宽,更高的增益,更强的定向性。采用射线理论和 Fabry-Perot 谐振腔模型分析了新波导缝隙天线辐射改善机理,并进行仿真和实验验证。仿真和实测结果表明:相比原始天线,加载覆层后,天线带宽增加了 34.6%,鼻锥方向增益提高了 6.94 dB,E、H 面半功率主瓣宽度分别减小了 24°和 128°。

关键词 频率选择表面;反射系数;高增益;波导缝隙天线

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.013

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0057-05

A High-gain and Directivity Enhanced Waveguide Antenna

ZHENG Yue-jun, GAO Jun, CAO Xiang-yu, YUAN Zi-dong, LI Wen-qiang
(Information and Navigation College, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: A double screen FSS with positive reflection phase gradient(the general with negative slope), above 0.83 reflection magnitude value and partially reflection features at 5.42~5.80GHz is designed and fabricated, the new waveguide antenan bandwidth is broadened, gain is improved and directivity is enhanced by applying the double screen FSS as a radome on the radiation orientation. The FSS radiation enhanced and scattering reduced mechanism are analyzed by adopting ray theory and Fabry-Perot resonator model, and the capabilities of new antenna are validated by simulation and experimentation. The results show that: the bandwidth of the antenna is increased by 34.6% and the gain of the antenna is enhanced by 6.94 dB, and the half-power beam width of E-plane and H-plane are reduced by 240 and by1280 respectively.

Key words: frequency selective surface; reflection coefficient; high-gain; waveguide antenna

频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)是一种空间滤波器^[1-4],是由金属屏上周期性的开孔单元(带通型),或由周期性排列的金属贴片单元(带阻型)构成的一种二维周期阵列结构^[5]。随着结构更复杂、精度更高等 FSS 已能够制备,其应

用领域也更加广泛^[6-7]。近年来,研究人员利用 FSS 制成部分反射表面^[8-10]来改善天线的辐射性能,比如提高微带天线的增益^[11]。

波导缝隙天线具有口面场分布容易控制、天线口径效率高、性能稳定、结构简单紧凑、易于机械制

收稿日期:2014-03-05

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2012JM8003)

作者简介:郑月军(1989—),男,江西上饶人,硕士生,主要从事天线设计、人工电磁材料研究.E-mail:erikzhengyang@126.com

*通信作者:高军(1962—),男,教授,主要从事天线与电磁兼容、人工电磁材料研究.E-mail:gigj9694@163.com

引用格式:郑月军,高军,曹祥玉,等.一种高增益强定向波导缝隙天线[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):57-61. ZHENG Yue-jun, GAO Jun, CAO Xiangyu, et al. A High-gain and Directivity Enhanced Waveguide Antenna[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 57-61.

造等优点,所以波导缝隙天线已成为新型雷达天线的优选形式,被广泛应用于雷达和通讯领域^[12]。然而想要提高波导缝隙天线的增益,通过加多缝隙数即组阵形式,但缝隙数越多,天线带宽越窄,主波束越锐,水平方向增益损失越大,且当频率偏离中心频率时,匹配特性变得越差^[13-14]。因此通过组阵不仅增大天线尺寸,也限制天线增益进一步提高。针对此,本文设计了一种具有部分反射特性的双屏条带状 FSS,并将其作为覆层加载到波导缝隙天线辐射方向上,使天线的增益等辐射性能得到极大改善。

1 理论分析

采用射线理论^[8,15]和 Fabry-Perot 谐振腔模型^[16-17]分析 FSS 覆层的辐射增强机理,见图 1。由于 FSS 覆层是部分反射表面,具有部分反射特性,波导缝隙天线辐射的电磁波在覆层与金属地板之间进行多次反射,传播距离变长,其中电磁波的相位差包含路径上的相位延迟和接地板的反射系数相位以及部分反射表面的反射系数相位。假设波导缝隙天线频率 f , 波长 λ , 接地板反射系数 $e^{j\varphi_1}$, 覆层反射系数 $R e^{j\varphi_2}$ 。

对所有透过 FSS 覆层的电磁波的电场强度进行幅相叠加得:

$$\mathbf{E} = \sum_{N=0}^{\infty} f(\theta) \mathbf{E}_0 R^N \sqrt{1-R^2} e^{j\Phi_N} \quad (1)$$

$$\Phi_N = N\Theta = N\left(-\frac{4\pi}{\lambda}h \cos\theta + \varphi_1 + \varphi_2\right) \quad (2)$$

式中: h 为地面与 FSS 间距离; $f(\theta)$ 为 θ 方向场强函数; Φ_N 为经覆层 N 次反射后辐射与直接辐射相位差。 θ 角见图 1。式(1)取模值化简得式(3)。

$$|\mathbf{E}| = |\mathbf{E}_0| f(\theta) \sqrt{\frac{1-R^2}{1+R^2-2R\cos\Theta}} \quad (3)$$

在 θ 角度方向的能量密度 S 为:

$$S = (1-R^2) f^2(\theta) / (1+R^2-2R\cos\Theta) \quad (4)$$

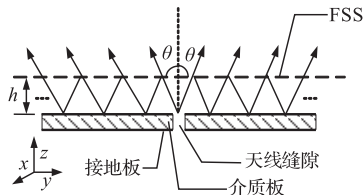


图1 反射射线模型

Fig.1 Reflection ray-tracing model

功率 P 为:

$$P = \iint_s \mathbf{S} \cdot d\mathbf{s} = \frac{[1-R^2]}{1+R^2-2R\cos\Theta} F^2(\theta) \quad (5)$$

正前方向($\theta=0$)功率变为:

$$P = (1-R^2) F^2(0) / (1+R^2-2R\cos\Theta) \quad (6)$$

当 $\Theta=2n\pi$ 时,能量密度最大,功率也最大,即

$$-\frac{4\pi}{\lambda}h \cos\theta + \varphi_1 + \varphi_2 = 2n\pi, n=0,1,\dots \text{ 时,}$$

$$P_{\max} = (1+R) F^2(0) / (1-R) \quad (7)$$

$$G_{\max} = P_{\max} / F^2(0) = (1+R) / (1-R) \quad (8)$$

半功率波瓣宽度为:

$$BW_{0.5} = \Delta f_{0.5} / f = \lambda(1-R) / 2\pi h \sqrt{R} \quad (9)$$

由式(6)可得,调整 f , h , φ_1 及 φ_2 满足 $\Theta=2n\pi$ 的谐振条件,天线的前向能量密度 S 最大,且与反射系数模值 R 成正比,同时 $G_{\max} \propto R$,因此反射系数越大,增益也将增大。通常情况下, $\varphi_1=\pi$, φ_2 略小于 π ,但接近 π ,由谐振条件可得:

$$\varphi_2 = 4\pi h / cf + (2n-1)\pi \quad (10)$$

即反射相位曲线斜率为正,与频率成正相关。 h 的值可取半个波长的倍数,倍数小于 1,反射次数增多,天线副瓣越大,考虑天线剖面的要求,一般取半波长,在此基础上进行优化,获得最大增益。

2 仿真与实验

2.1 FSS 结构设计与分析

本文设计的覆层是在介质板表面周期刻蚀金属贴片而形成的 3 层式结构见图 2。上下 2 层为条带金属贴片,中间为聚四氟乙烯介质板。

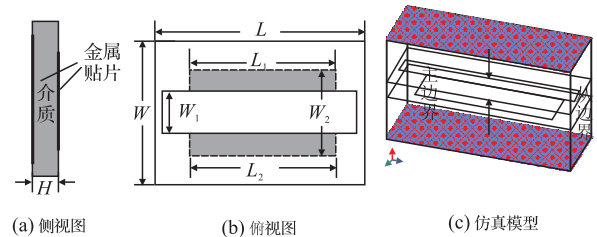


图2 FSS 单元示意图

Fig.2 FSS unit cell structure

利用 Ansoft HFSS 软件中的 Floquet 端口和主从边界以一个单元结构模拟无限周期结构进行建模,见图 2(c)。对于 TE 和 TM 2 种极化方式下不同角度的入射波,仿真得到的 S_{11} 曲线见图 3。可以看出,随入射角增大到 60° ,反射系数相位在 $5.42 \sim 5.80$ GHz 频带内都会随频率增大而增大,即都具有斜率为正的相位频响曲线;反射系数模值均大于 0.83,即覆层都具有较强的反射。入射角越大,反射系数相位增大的频段越窄,反射系数模值越大。根据式(7)~式(9),反射系数模值 R 越大,辐射功率和增益越大,半功率波瓣宽度越窄,因此增益得到提高,定向性得到增强。根据式(10),覆层反射相位 φ_2 的曲线斜率为正,即与频率成正比,覆层高度 h

在较宽频带范围内满足谐振条件。

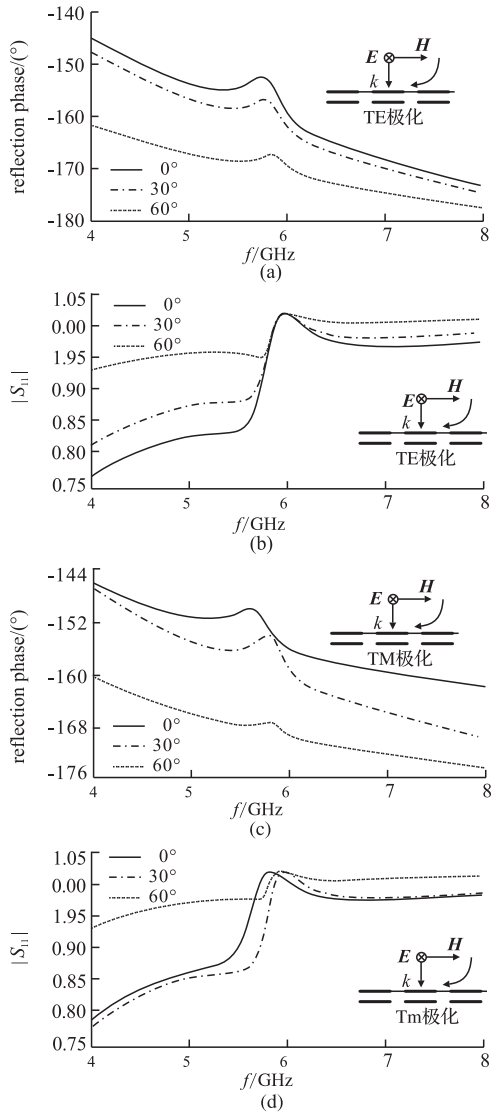


图 3 仿真 S_{11} 曲线

Fig.3 Simulated S_{11} curves

2.2 天线辐射性能的仿真验证

利用设计好的双屏 FSS 作为波导缝隙天线的覆层。图 4 给出了原始天线和不同高度加载覆层的天线 S_{11} 仿真曲线。可以看出覆层的加载对谐振频率和天线带宽有一定的影响,当覆层高度为 $h = 23$ mm 时 S_{11} 谐振最深,谐振频率为 5.6 GHz,此时天线工作频段为 5.3~5.9 GHz,比原天线 5.4~5.8 GHz 增加 0.2 GHz。

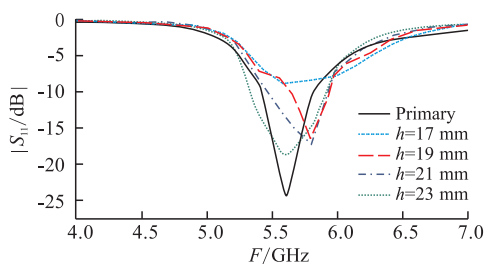


图 4 加载 FSS 覆层前后 S_{11} 曲线

Fig.4 S_{11} curves with and without FSS radome

图 5 给出了 5.6 GHz 处加载覆层前后 E 面和 H 面方向图。可以看出相比初始天线,加载覆层后天线的增益都有明显提高,在 $h = 21$ mm 时,最大增益达到 14.12 dB,提高了 8.28 dB。

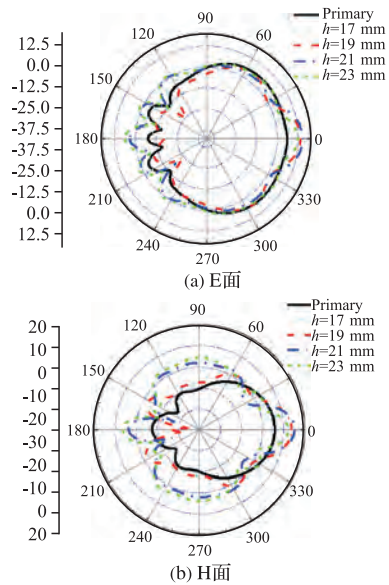


图 5 仿真加载 FSS 覆层前后 E 面和 H 面方向图

Fig.5 Simulated radiation with and without FSS radome

表 1 给出了不同高度下 5.6 GHz 时天线的辐射性能仿真结果。

图 6、7 是两天线在 5.6 GHz 处的表面电场分布对比和覆层加载高度 h 为 21 mm 时的三维方向图对比。由表 1 和图 6 可以看出,加载覆层后,相当于天线的辐射口径增大,提高了天线增益。由图 7 可得,加载覆层后,增强了天线的方向性。这一结果证实了理论分析的正确性。

表 1 天线的辐射性能仿真结果

Tab.1 Simulated radiation performance results of antenna

覆层高度 h /mm	无	17	19	21	23	
增益/dBi	5.84	8.74	13.88	14.12	12.18	
3 dB 带宽/(°)	E 面	155	21	25	26	21
	H 面	59	28	26	21	18

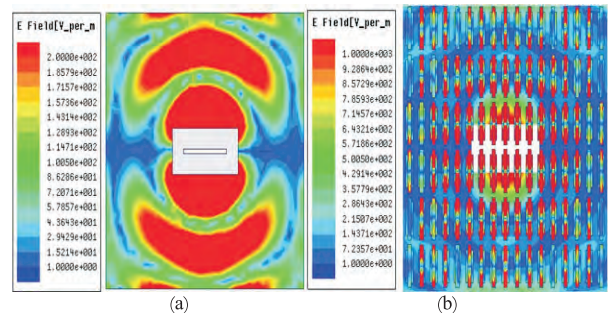


图 6 加载 FSS 覆层前后天线电场分布

Fig.6 Electric field distribution of E plane and H plane with and without FSS radome

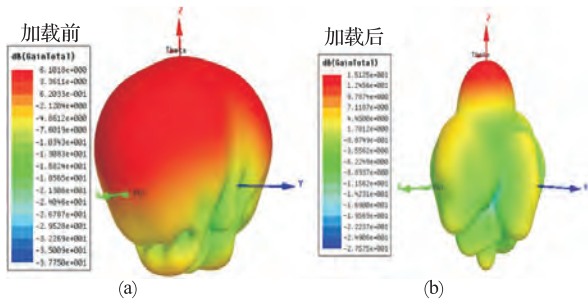


图7 加载 FSS 覆层前后天线三维方向图

Fig.7 Radiation pattern of 3D with and without FSS radome

2.3 天线辐射性能的实验验证

为了验证仿真结果,加工了天线实物见图 8。

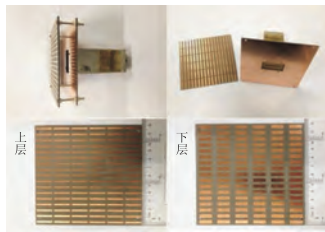


图8 天线实物图

Fig.8 Pictures of antenna

天线的口径为 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$, 缝隙尺寸为 $26.1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 馈电波导采用 C 波段的标准波导(国标型号:WJB-58), 宽边长 40.4 mm , 窄边长 20.2 mm 。利用 AgilentN5230C 矢量网络分析仪和远场测量法, 在高度 $h = 21\text{ mm}$ (仿真结果中增益最高)时进行了测量。测量的 S_{11} 曲线, E 面和 H 面方向图分别见图 9 和图 10。实测结果表明: 初始天线中心频率为 5.62 GHz , 工作频带 $5.34 \sim 5.89\text{ GHz}$, 带宽为 0.55 GHz ; 加载覆层后天线中心频率 5.61 GHz , 工作频带为 $5.24 \sim 5.98\text{ GHz}$, 带宽为 0.74 GHz 。相比初始天线, 覆层天线中心频率降低 0.1 GHz , 带宽由 0.55 GHz 增加到 0.74 GHz , 扩宽了 34.6% ; 5.6 GHz 时 E 面最大增益提高了 6.94 dB , H 面最大增益提高了 7.77 dB , 与仿真结果 8.28 dB 分别有 1.34 dB 和 0.51 dB 的偏差; E、H 面半功率主瓣宽度分别减小了 24° 和 128° 。实验结果进一步证实了设计的正确性。

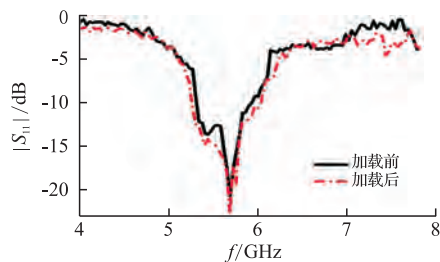


图9 加载 FSS 覆层前后实测 S_{11} 曲线

Fig.9 Measured S_{11} curves of antenna with and without FSS radome

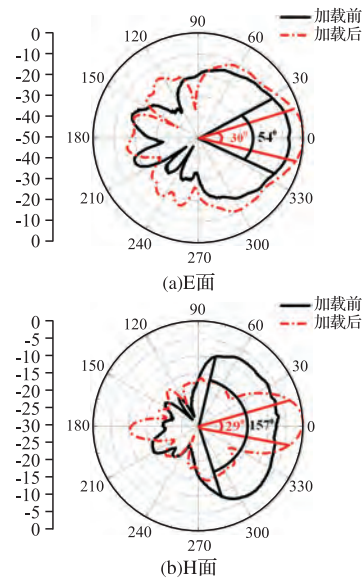


图10 加载 FSS 覆层前后实测方向图

Fig.10 Measured radiation with and without FSS radome

3 结语

本文设计了一种具有部分反射特性的双屏 FSS, 其反射相位曲线斜率为正, 反射系数模值大于 0.83 。将这种 FSS 以覆层的形式加载到波导缝隙天线上。结果表明: 相比原始天线, 新天线的带宽增加了 34.6% , 前向增益提高了 6.94 dB , E、H 面半功率主瓣宽度分别减小了 24° 和 128° 。天线的辐射性能得到了改善。本文提出的 FSS 设计方法对于提高天线的增益增强定向性是行之有效的, 该方法也为提高缝隙阵列天线的增益提供了借鉴。

参考文献(References):

- [1] 李育青, 裴志斌, 屈绍波, 等. 一种具有良好带通性能的二阶频率选择表面设计与验证[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(4): 73-77.
LI Yuqing, PEI Zhibin, QU Shaobo, et al. The design and validation of a second-order FSS with good band-pass performance[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(4): 73-77. (in Chinese)
- [2] Yuki K, Toshikazu H, Mitoshi F, et al. Low-profile design of metasurface considering FSS filtering characteristics[J]. IEEE trans on anten and propag, 2012, 2(2): 477-483.
- [3] Wutk. Frequency selective surface and gridarray [M]. New-York: Wiley, 1995.
- [4] Hang Z, Shao-bo Q, Baoqin L, et al. Filter-antenna consisting of conical FSS radome and monopole antenna[J]. IEEE trans on anten and propag, 2012, 60(6): 3040-3045.
- [5] Sun L K, Cheng H F, Zhou Y J, et al. Design of a lightweight magnetic radar absorber embedded with resistive FSS[J]. IEEE anten and wire propag lett, 2012, 11: 675-678.
- [6] Zelenchuk D, Fusco V. Double split ring slot FSS reflectarray for difference pattern generation[J]. Electron lett, 2013, 49(1): 177-178.

- [7] Cheng-Nan C, Wen-Yi W. A dual-frequency miniaturized element FSS with closely located resonances[J]. *Anten and wire propag lett*, 2013, 12: 163-165.
- [8] Feresidis A P, Vardaxoglou J C. High gain planar antenna using optimized partially reflective surfaces[J]. *IEEE proc microw antennas propag*, 2001, 148(6): 345-350.
- [9] Andrew R W, Trevor S B, Guo Y J. A reconfigurable high-gain partially reflecting surface antenna[J]. *IEEE trans on anten and propag*, 2008, 56(11): 3382-3390.
- [10] Yuehe G, Karu P E, Trevor S B. The use of simple thin partially reflective surfaces with positive reflection phase gradients to design wideband, low-profile EGB resonator antennas[J]. *IEEE trans anten and propag*, 2012, 60(2): 743-750.
- [11] 袁子东, 高军, 曹祥玉, 等. 基于双层 FSS 的 X 波段高增益微带天线[J]. *微波学报*, 2013, 21(29): 55-59.
YUAN Zidong, GAO Jun, CAO Xiangyu, et al. A X-band high-gain microstrip antenna based on FSS[J]. *Journal of microwaves*, 2013, 21(29): 55-59. (in Chinese)
- [12] 杨倩, 李迎松, 杨晓冬, 等. 波导缝隙全向天线的设计与分析[J]. *应用科技*, 2010, 37(1): 19-22.
YANG Qian, LI Yingsong, YANG Xiaodong, et al. Design and analysis of wide wall slotted-waveguide array[J]. *Applied science and technology*, 2010, 37(1): 19-22. (in Chinese)
- [13] 邸英杰. 梯形单脊波导缝隙天线的研究与应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 1999.
DI Yingjie. Analysis of slot array in single-ridged trapezoidal waveguides and applications[D]. Xi'an: Xidian university, 1999. (in Chinese)
- [14] 陈亮, 党晓杰, 梁昌洪. EBG 结构在介质覆层波导缝隙相控阵中的应用[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(1): 115-118.
CHEN Liang, DANG Xiaojie, LIANG Changhong. Application of EBG structures in waveguide end-solt phased arrays under a dielectric sheet[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(1): 115-118. (in Chinese)
- [15] James J R, Kinany S J A, Peel P D, et al. Leaky-wave multiple dichroic beamformers[J]. *Electron lett*, 1989, 25: 1209-1211.
- [16] Boutayeb H K, Mahdjoubi, Tarot A C, et al. Directivity of an antenna embedded inside a fabry-perot cavity: analysis and design[J]. *Microwave opt tech lett*, 2006, 48(1): 12-17.
- [17] Boutayeb H K, Denidni T A, Nedil M. Bandwidth widening techniques for directive antennas based on partially reflecting surfaces[J]. *Progress in electromagnetics research*, 2007, 74: 407-419.

(编辑:徐楠楠)

(上接第 56 页)

- [7] Jiao C, Li L, Cui X, et al. Subcell FDTD analysis of shielding effectiveness of a thin-walled enclosure with an aperture[J]. *IEEE trans magn*, 2006, 42(4): 1075 - 1078.
- [8] Martin Paul Robinson, Trevor M Benson, Christos Christopoulos, et al. Analytical formulation for the shielding effectiveness of enclosures with apertures[J]. *IEEE trans electromagn. compat*, 1998, 40(3): 240-248.
- [9] 汪柳平, 高攸纲. 有孔矩形腔的屏蔽效能及其对谐振抑制研究[J]. *电波科学学报*, 2008, 23(3): 560-564.
WANG Liuping, GAO Yougang. Analysis of shielding effectiveness for rectangular cavity with apertures and resonance suppression[J]. *Chinese journal of radio science*, 2008, 23(3): 560-564. (in Chinese)
- [10] 石丹, 沈远茂, 高攸纲. 有孔屏蔽腔屏蔽效能的高次模式分析[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(3): 510-513.
SHI Dan, SHEN Yuanmao, GAO Yougang. High-order modes analysis on shielding effectiveness of enclosure with off-center aperture[J]. *Chinese journal of radio science*, 2009, 24(3): 510-513. (in Chinese)
- [11] 路宏敏, 罗朋, 刘国强, 等. 有孔阵矩形机壳屏蔽效能研究[J]. *兵工学报*, 2009, 30(6): 695-700.
LU Hongmin, LUO Peng, LIU Guoqiang, et al. Shielding effectiveness of PCB loaded rectangular enclosure with circular aperture array[J]. *Acta armamentarii*, 2009, 21(1): 108-112. (in Chinese)
- [12] Shim Jong joo, Kam Dong Gun, Kwon Jong Hwa, et al. Circuit modeling and measurement of shielding effectiveness against oblique incident plane wave on apertures in multiple sides of rectangular enclosure[J]. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, 2010, 52(3): 566-577.
- [13] 翁凌雯, 朱忠霞, 林竞羽, 等. 运用 BLT 方程研究高功率微波的电磁干扰[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1272-1276.
WENG Lingwen, NIU Zhongxia, LIN Jingyu, et al. Application of BLT equation to electromagnetic interaction of high power microwave[J]. *High power laser and particle beams*, 2005, 17(8): 1272-1276. (in Chinese)
- [14] 安霆, 刘尚合. 基于 BLT 方程的电磁干扰建模[J]. *高电压技术*, 2007, 33(12): 55-58.
AN Ting, LIU Shanghe. Modeling for electromagnetic interaction by the BLT equation[J]. *High voltage engineering*, 2007, 33(12): 55-58. (in Chinese)
- [15] 鱼群, 王亚弟, 韩继红, 等. BLT 方程的时域扩展及其在微带线中的应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(11): 2372-2376.
YU Qun, WANG Yadi, HAN Jihong, et al. Development of the BLT equation in the time domain and its application in line[J]. *Systems engineering and electronics*, 2011, 33(11): 2372-2376. (in Chinese)
- [16] Baum C E. Including apertures and cavities in the BLT formalism[J]. *Electro magnetics*, 2005, 25(7-8): 623-635.

(编辑:徐楠楠)