

一种高增益低 RCS 微带天线设计

丛丽丽, 曹祥玉*, 李文强, 赵一, 宋涛

(空军工程大学信息与导航学院,西安,710077)

摘要 设计了一种基于人工电磁材料的覆层,并将其应用于微带天线。该覆层由介质板及其两侧的人工周期表面构成,上表面是加载集总电阻的方环贴片,具有宽带吸波特性;下表面是开条带缝和圆环缝的金属贴片,具有部分反射特性。将其加载到微带天线的上方,通过上层的吸波表面吸收入射电磁波并结合下层的部分反射表面与金属地板构成 Fabry-Perot (F-P) 谐振腔增强天线的定向性,以实现微带天线辐射和散射性能的改善。仿真和实测结果表明加载人工电磁材料覆层后,天线的 RCS 在 2~14 GHz 宽频带范围内实现了明显的减缩,最大减缩量达到 28.3 dB 而天线的增益在工作频带内都得到了提升,最大提高了 4.3 dB。

关键词 人工电磁材料;覆层;雷达散射截面;吸波;Fabry-Perot 谐振腔

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.015

中图分类号 TN82 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)02-0067-06

A Novel Low RCS Design for Patch Antenna with High Gain Performance

CONG Li-li, CAO Xiang-yu*, LI Wen-qiang, ZHAO Yi, SONG Tao

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

Abstract: A novel design for patch antenna, which can obtain low radar cross section (RCS) and high gain performance simultaneously, is proposed on the basis of metamaterial superstratum. The superstratum consists of two metallic layers with different patterns on both sides of a dielectric substrate. Low reflection and transmission are obtained from the upper surface which can absorb most of the incident wave to reduce the antenna RCS. The bottom surface, which has partial reflectivity, is used to construct a Fabry-Perot resonance cavity with the ground plane of the patch antenna to improve its directivity. Simulated and measured results show that the proposed antenna can achieve an obvious RCS reduction in a broad frequency band ranging from 2 to 14 GHz and the maximum reduction can reach 28.3 dB, and yet the gains of the antenna are all enhanced and some are even enhanced maximally by 4.3 dB in the working frequency band compared with the original antenna.

Key words: metamaterial; superstratum; radar cross section; wave absorption; Fabry-Perot resonance cavity

收稿日期:2014-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271100, 61471389);陕西省自然科学基金资助项目(2012JM8003)

作者简介:丛丽丽(1991-),女,山东文登人,硕士生,主要从事天线 RCS 减缩方向研究。

*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,计算电磁学等研究。E-mail: gjgj9694@163.com

引用格式:丛丽丽,曹祥玉,李文强,等.一种高增益低 RCS 微带天线设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(2):67-72. CONG Lili, CAO Xiangyu, LI Wenqiang, et al. A Novel Low RCS Design for Patch Antenna with High Gain Performance[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(2): 67-72.

在电子战与信息战飞速发展的今天,隐身技术的优劣已经直接关系到作战平台的突防和生存能力。雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),作为对目标隐身能力的一种度量,定量地反映了目标对电磁波反射能力的大小。为提升武器装备隐身性能,大幅度降低目标平台被敌方发现的概率,就要求尽量降低目标的 RCS 特征。随着现代隐身技术的快速发展,飞行器以及舰艇等平台的 RCS 已经得到了有效地减缩,但天线的 RCS 已成为制约战机平台总体隐身性能提高的重要瓶颈。天线作为一种特殊的散射体,在实现其 RCS 减缩的同时必须保证自身电磁波的正常发射和接收,因此,常规的 RCS 减缩方法(如低 RCS 外形设计^[1]、雷达吸波材料技术^[2-4]等,已不能简单地直接应用于天线设计中。

天线雷达散射截面减缩所面临的最大问题在于天线辐射性能与散射性能两方面的兼顾,如何实现天线只辐射和接收我方雷达波,不反射和散射敌方雷达波,这实际上是很难解决的一对矛盾。截至目前,仍然是通过某种折中设计在一定程度上实现 RCS 减缩的目的,没有根本解决天线辐射性能与隐身之间的矛盾。

人工电磁材料(Metamaterial, MTM),是通过在一种介质中嵌入周期或非周期性金属、介质结构使其呈现出自然界材料所不具备的奇异电磁特性^[5-7]。这些新奇的特性为低 RCS 天线的设计提供了一种新的技术途径。文献[6]通过采用频率选择表面(Frequency selective surfaces, FSS),取代传统微带天线的金属接地板,利用其带内全反射(表现出全反射金属面特性)、带外全传输的特点,实现了天线带外后向 RCS 的减缩;文献[8]采用带通型频率选择表面(FSS)和极化选择表面(PSS)构成频率选择雷达天线罩,实现了带外 RCS 减缩;文献[9]基于 Salisbury 屏吸波原理,通过在同相反射表面加载电阻构成吸波材料,使其与天线共面实现带内天线 RCS 减缩,但是该方法破坏了天线的辐射环境,导致天线增益下降;文献[10]利用 AMC 与 PEC 反射波相位相反的特点,构造相位相消屏并用于波导缝隙天线,实现了天线带内鼻锥方向的 RCS 减缩;文献[11]提出了一种交叉缝隙的超薄完美吸波体,并与波导缝隙天线共形设计,在 $-25^{\circ} \sim +25^{\circ}$ 角度范围,天线 RCS 减缩均在 5 dB 以上,鼻锥方向的 RCS 减缩超过 12 dB;文献[12]将 mushroom-like EBG 与天线制作于介质板的同一表面,利用 EBG 的同相反射特性实现 EBG 表面与天线的散射场对消,在天线工作频带内,其 RCS 峰值下降了 8.2 dB,同时由于 EBG 结构的高阻表面特性,天线的互耦得到了抑

制;文献[13~14]将部分反射表面(Partially reflecting surface, PRS)引入天线覆层的设计,并与天线一体化改善了天线的性能。微带天线由于其体积小、低轮廓、易共形、电性能多样化等优点,在作战武器平台上有广阔的应用前景^[15]。

1 结构设计与分析

1.1 覆层结构设计与分析

本文设计的覆层单元结构见图 1。单元周期为 12 mm,上层是由加载集总电阻的方环贴片构成的吸波表面,环外边长 $L_1 = 8$ mm,环宽 $w_2 = 1$ mm,开口长 $w_1 = 1$ mm,方环贴片开口处加载集总电阻 $R = 200\Omega$;中间层是 FR4 介质层,介电常数 $\epsilon_r = 4.4$,电损耗正切 $\tan\delta = 0.02$,厚度 $t = 3.5$ mm;下层是由开条带缝和圆环缝的金属贴片构成的部分反射表面,中心圆环缝的外径为 2.4 mm,内径为 2.25 mm,四边缝隙长 $L_2 = 6.8$ mm,宽 $w = 0.1$ mm。对称的单元结构设计使得覆层天线罩对于不同角度入射的电磁波都具有较好的极化稳定性。

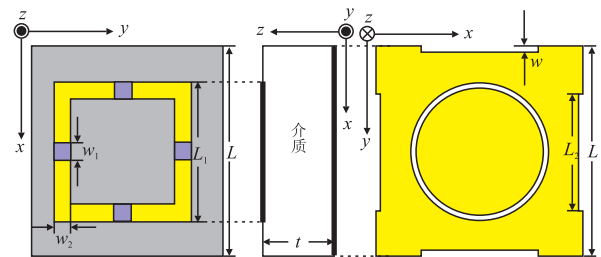


图 1 覆层单元结构图

Fig.1 Unit cell of superstrate structure

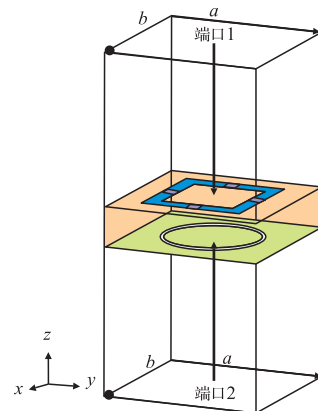


图 2 覆层仿真模型示意图

Fig.2 Simulation model of superstrate structure

利用 Ansoft HFSS 14.0 软件中的 Floquet 端口和主从边界条件模拟无限周期结构,仿真模型见图 2。电磁波由端口 2 入射时(方向 $-z$ 到 $+z$),2 种极化情况下覆层反射层的频率响应曲线见图 3(a)、(b),从图中可以看出,对于 x 极化,下层开缝

隙表面的谐振频率为 11.58 GHz,反射系数相位曲线的斜率在 11.33~11.73 GHz 的频率范围内都为正,反射系数模值均在 0.8 以上;对于 y 极化,下层开缝隙表面产生的谐振频率略向高频偏移,反射系数相位曲线的斜率在谐振频率附近仍然保持为正,反射系数模值均在 0.82 以上。由仿真结果可见,无论 x 极化还是 y 极化,覆层均具有较强的部分反射特性。

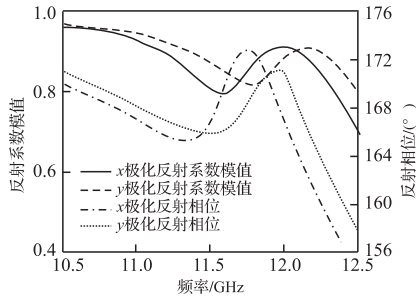


图 3 反射层频率响应曲线

Fig.3 Simulated reflection coefficient of the RS

电磁波由端口 1 入射时(方向 +z 到 -z),2 种极化情况下上层吸波表面的频率响应曲线和吸波率曲线见图 4~5,从图中可以看出,对于 x 极化,在 5.78~11.34 GHz 的频带范围内,反射系数 $S_{11} < -10$ dB,透射系数 $S_{21} < -10$ dB,反射波和透射波都很小,由吸波率计算公式 $A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2$ 可知,在上述频段内吸波率都在 81% 以上;对于 y 极化,在 5.78~11.53 GHz 的频带范围内,反射系数 $S_{11} < -10$ dB,透射系数 $S_{21} < -10$ dB,在该频段内吸波率都在 88% 以上。仿真结果表明,上层表面在 2 种极化状态下都能在宽频带范围内吸收入射电磁波。

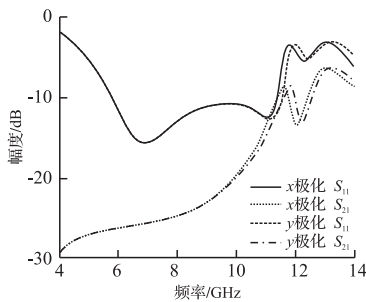


图 4 吸波层频率响应曲线

Fig.4 Frequency response of the AS

1.2 加载覆层后微带天线仿真性能分析

将上述设计的人工电磁材料覆层加于微带天线正上方,天线结构示意图和仿真模型示见图 6。当天线的谐振频率和覆层的结构固定后,覆层的加载高度成为影响天线辐射性能和散射性能的最主要因素。其高度 h 可由式 $h = \frac{\lambda(\angle\varphi_1 + \angle\varphi_2)}{4\pi} - d\sqrt{\epsilon_A}$

$+\frac{k\lambda}{2}, k=0,1,2\dots$ 决定^[15], $\angle\varphi_1$ 和 $\angle\varphi_2$ 分别为部分反射表面 PRS 和金属接地板的反射相位, ϵ_A 为天线介质板的相对介电常数, d 为天线介质板的厚度),经过参数优化,最终选定加载的高度为 $h = 12.9$ mm。

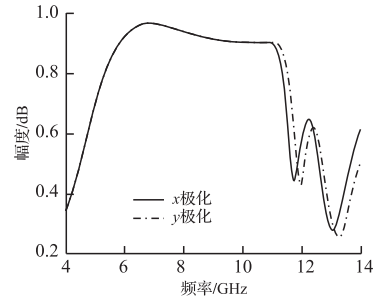
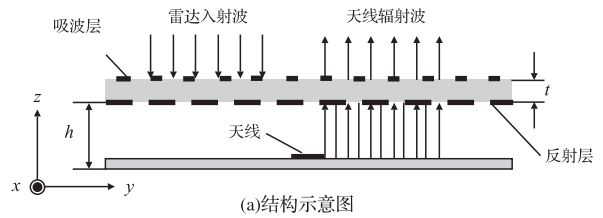
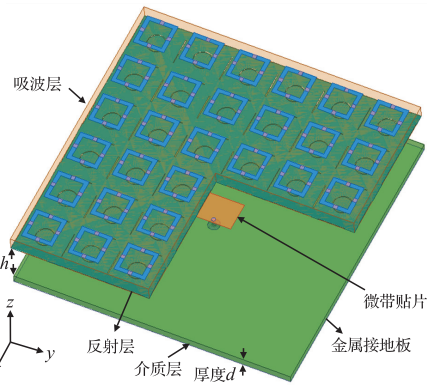


图 5 吸波率曲线

Fig.5 Absorption of the AS



(a)结构示意图



(b)仿真模型示意图

图 6 加载覆层后天线示意图

Fig.6 Simulated model and schematic view of the antenna with superstrate

图 7 分别给出了加载覆层前后天线的反射系数曲线和增益曲线对比。从图中可以看出,加载覆层后,天线的谐振频率向低频偏移, -10 dB 阻抗带宽范围为 11~12 GHz,较原始天线有所减小,由于下层的部分反射表面与金属地板构成 Fabry-Perot (F-P) 谐振腔,增大了天线的辐射口径,使得天线增益在 10.93~11.93 GHz 的频带范围内有所提高,最大提高了 4.3 dB。

图 8 给出了加载覆层前后,天线在 11.66 GHz 处 E 面和 H 面方向图对比图。从图中可以看出,加载覆层后,天线的定向性得到了明显改善,增益有所提高。

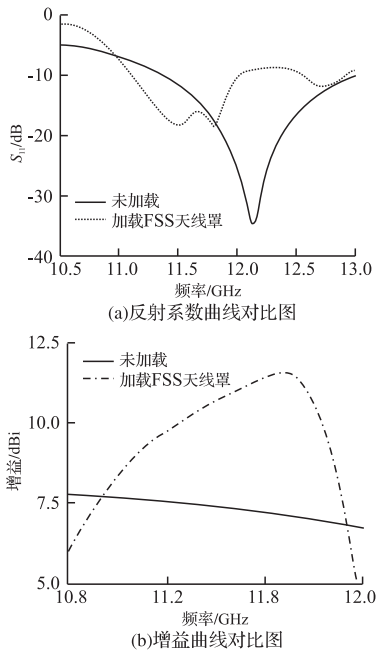


图 7 加载覆层前后辐射性能对比

Fig.7 Comparisons of S_{11} and gain of the antenna with and without superstrate

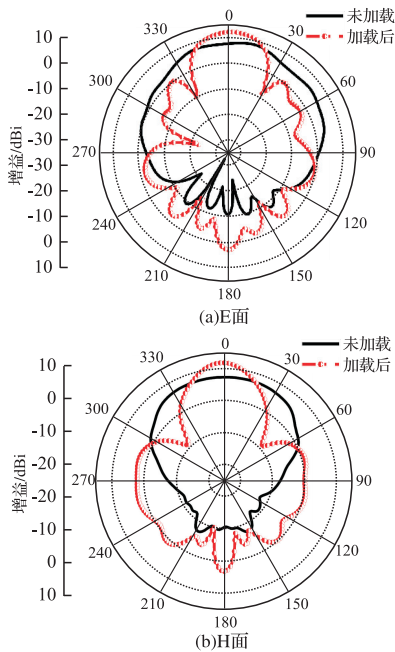


图 8 加载覆层前后方向图对比图

Fig.8 Comparisons of simulated radiation patterns of the antenna with and without superstrate

为了分析天线的散射性能,分别用 x 极化和 y 极化的平面波照射加载覆层前后的天线。图 9 给出了加载覆层前后天线 RCS 曲线对比图。从图中可以看出,无论 x 极化还是 y 极化,天线在 $2 \sim 14$ GHz 的宽频带范围内均实现了 RCS 的有效减缩,最大减缩量分别为 26.7 dB 和 20.5 dB。仿真结果证明了加载覆层后的天线在 x 极化和 y 极化条件下都具有宽带的低 RCS 特性。

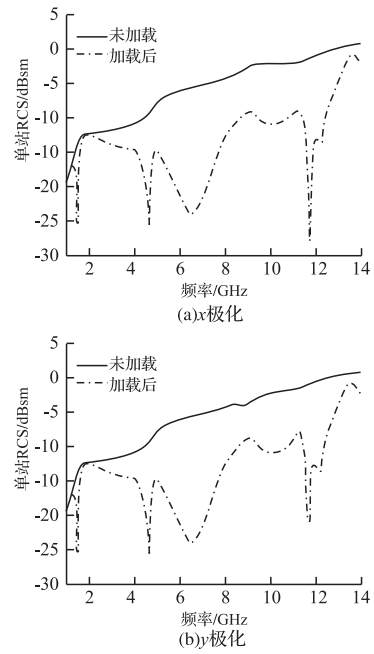


图 9 加载超材料覆层后 RCS 减缩图

Fig.9 Frequency response of the RCS of the antennas with and without superstrate

2 实测分析

加工制作了人工电磁材料覆层和微带天线,为了减小一体化带来的影响采用塑料螺钉将天线固定在微带天线正上方,天线实物和实测配置图见图 10。利用 Agilent N5230C 矢量网络分析仪对加载覆层前后天线的 S_{11} 进行了测试,测试结果见图 11,从图中可以看出,原始天线以及加载覆层后的天线实测 -10 dB 阻抗带宽分别是 $10.8 \sim 12.5$ GHz 和 $10.9 \sim 12$ GHz,阻抗带宽较仿真结果均向低频有所偏移,这是由覆层加载高度与仿真有所偏差导致的。实测结果表明加载覆层后天线的谐振频率向低频偏移,带宽有所减小,与仿真结果一致,验证了设计的正确性。

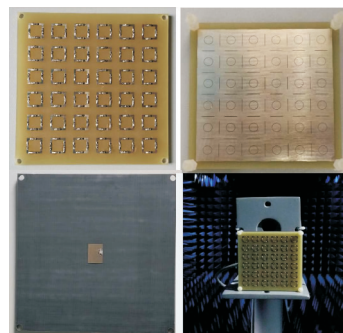


图 10 天线实物图

Fig.10 Fabricated antenna

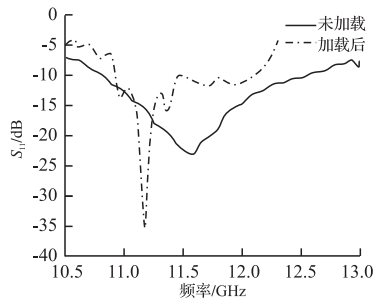


图 11 加载覆层前后 S_{11} 实测结果

Fig.11 Measured S_{11} results of the antenna with and without superstrate

选取加载覆层后天线的谐振点为测试频点,该频点处 E 面和 H 面方向图见图 12。由实测结果可知,加载覆层后,天线 E 面和 H 面增益最大提高了 3.9 dB 和 4.27 dB,实测结果验证了加载覆层后天线的定向性得到了提高,与仿真结果保持一致。

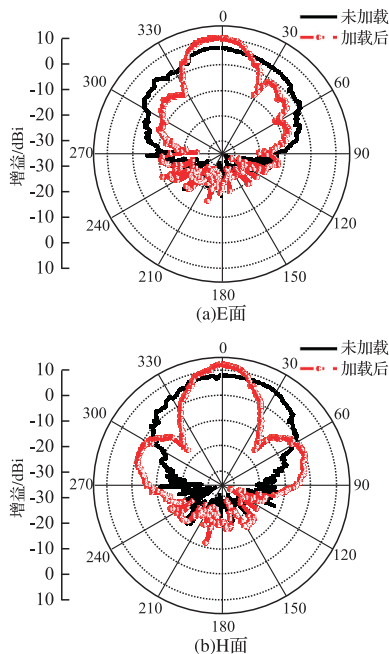
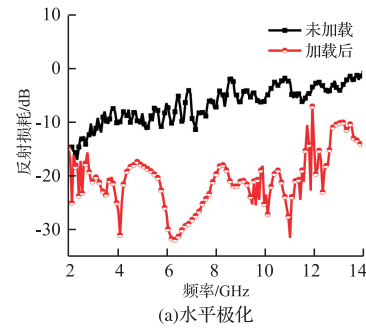


图 12 实测方向图

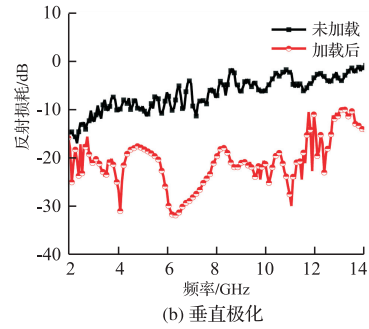
Fig.12 Measured radiation patterns

为验证天线 RCS 减缩性能,通过 2 个宽带喇叭天线,一个作为发射端,一个作为接收端,发射端的天线辐射电磁波照射到待测天线上,经天线散射后的电磁波由接收端的天线接收。图 13 给出了 2~14 GHz 频带范围内两种极化情况下加载覆层前后天线对于垂直入射波的反射损耗曲线,从图中可以看出,水平极化(对应仿真模型中 x 极化)情况下,待测天线在 2~14 GHz 的宽频带范围内均实现了 RCS 的有效减缩,其中,在 4 GHz、6 GHz、11 GHz 3 个频点处的减缩量分别为 21.1 dB、22.7 dB、28.3 dB;垂直极化(对应仿真模型中 y 极化)情况下也有类似的 RCS 减缩效果,最大减缩量为 24.1 dB。测试结果与仿真结果基本一致,验证了该天线具有宽

带低 RCS 特性。



(a)水平极化



(b)垂直极化

图 13 实测天线反射损耗曲线

Fig.13 Measured reflection losses result

3 结论

本文基于 F-P 谐振腔理论模型和电阻能量耗散吸波原理设计了一种基于人工电磁材料的覆层,通过合理设计覆层结构,使其上表面具有吸波特性和部分反射特性,将其加载于微带天线正上方,有效地改善了微带天线的辐射特性和散射特性。实测结果表明:加载覆层后的天线 RCS 在 2~14 GHz 的宽频带范围内得到了有效减缩,最大减缩量达到了 28.3 dB,同时在天线工作频带内增益有所提高,最大提高 4.3 dB,天线方向性得到增强。本文的研究对于兼顾微带天线的辐射和散射特性,在实现低 RCS 的同时实现天线的增益改善,增强天线的定向性有一定的借鉴作用。

参考文献(References):

[1] 姜文, 龚书喜, 洪涛, 等. 低雷达截面的超宽带扇形天线[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2162-2165.
 JIAN Wen, GONG Shuxi, HONG Tao, et al. Fan-Shaped Antenna with Low RCS for Ultra-Wideband Application[J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(9): 2162-2165. (in Chinese)

[2] 杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 等. 基于超材料吸波体的低雷达散射截面微带天线设计[J]. 物理学报, 2013, 62(6): 0641031-0641037.
 YANG Huanhuan, CAO Xiangyu, GAO Jun, et al.

- Design of Low Radar Cross Section Microstrip Antenna Based on Metamaterial Absorber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6):0641031-0641037. (in Chinese)
- [3] Pozar D M. RCS Reduction for A Microstrip Antenna Using a Normally Biased Ferrite Substrate[J]. *IEEE Microw. Guided Wave Lett*, 1992, 2(5):1996-1998.
- [4] Yang J, Shen Z. A thin and Broadband Absorber Using Double-Square Loops [J]. *IEEE Antennas Wireless Propag Lett*, 2007, 6:388-391.
- [5] Ma Y, Chen Q, Grant J, et al. A Terahertz Polarization Insensitive Dual Band Metamaterial Absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(6):945-947.
- [6] Simone Genovesi, Filippo Costa, Agostino Monorchio. Low Profile Array with Reduced Radar Cross Section by Using Hybrid Frequency Selective Surfaces [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propag*, 2012, 60(5):2327-2335.
- [7] Weiglhofer W S, Lakhtakia A. *Introduction to Complex Mediums for Optics and Electromagnetics*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2003.
- [8] Zhou Hang, Qu Shaobo, Lin Shaobo, et al. Filter-Antenna Consisting of Conical FSS Radome and Monopole Antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propag*, 2012, 60(6):3040-3045.
- [9] Li Youquan, ZHANG Hui, FU Yanqi, et al. RCS Reduction of Ridged Waveguide Slot Antenna Array Using EBG Radar Absorbing Material[J]. *IEEE Antenn. and Wireless Propag Lett*, 2008, 7:473-476.
- [10] Tan Y, Yuan N, Yang Y, et al. Improved RCS and Efficient Waveguide Slot Antenna[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(10):582-583.
- [11] 刘涛, 曹祥玉, 孟军, 等. 基于超材料的吸波体设计及其波导缝隙天线应用[J]. *物理学报*, 2012, 61(18):184101.
- LIU Tao, CAO Xiangyu, MENG Jun, et al. Design of Metamaterial Absorber and Its Applications for Waveguide Slot Antenna[J]. *Ada Phys sin*, 2012, 61(18):184101. (in Chinese)
- [12] Zhang J J, Wang J H, Chen M E. RCS Reduction of Patch Array Antenna by Electromagnetic Band-Gap Structure[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11:1048-1051.
- [13] Ge Y, Esselle K P, Bird T S. The use of Simple Thin Partially Reflective Surfaces with Positive Reflection Phase Gradients to Design Wideband, Low-Profile EBG Resonator Antennas[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2012, 60(2):743-750.
- [14] Pan Wenbo, Huang Cheng, Chen Po, et al. A Low-RCS and High-Gain Partially Reflecting Surface Antenna [J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2014, 62(2):945-949.
- [15] 周军, 王玉峰, 周江昇. 一种宽频圆极化 H 形缝耦合微带天线设计[J]. *微波学报*, 2010, 26(S1):153-156.
- ZHOU Jun, WANG Yufeng, ZHOU Jiangsheng. Design of A Broadband Circularly-Polarized H-Sharped Aperture-Coupled Microstrip Antenna[J]. *Journal of Microwave*, 2010, 26(S1):153-156. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)