

一种加载超材料吸波体的新型二面角反射器的设计

祝寄徐, 裴志斌, 屈绍波, 谢明达

(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 针对传统角反射器的性能强烈依赖于入射波长、难以对抗变频雷达的探测这一问题, 设计了一种加载超材料吸波体的新型角反射器, 在 8 GHz、11.5 GHz 以及 12 GHz 这 3 个频点, 产生近似相同的后向雷达散射截面, 并对该角反射器的性能进行测试验证, 结果表明: 加载超材料吸波体后, 在 11.5 GHz 频点, 其中心 RCS 值下降约 2 dBsm; 在 12 GHz 频点, 其中心 RCS 值下降约 3.6 dBsm, 在 8 GHz 频点, 其 RCS 值与普通角反射器一致, 两者的 RCS 曲线无明显差别。该新型角反射器性能满足设计要求, 为有效对抗 X 波段(8~12 GHz)变频雷达对角反射器假目标的探测与识别尝试了新的途径。

关键词 角反射器; 超材料; 吸波; 雷达散射截面

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.020

中图分类号 TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0085-04

A Design of A New Dihedral Corner Reflector Loaded with Meta-material Absorbing Layer

ZHU Ji-xu, PEI Zhi-bin, QU Shao-bo, XIE Ming-da

(Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In view of the problem that the performance of the traditional corner reflector is strongly dependent on the incident wavelength which makes it difficult to avoid the detection of frequency conversion radar, this paper designs a new corner reflector loaded with meta-material wave-absorbing layer, which creates approximately the same backward radar cross sections respectively at frequency points of 8 GHz, 11.5 GHz and 12 GHz. The test on the performance of the corner reflector shows that after the loading meta-materials absorbing layer is processed, the RCS value is decreased by about 2 dBsm at 11.5 GHz and decreased by about 3.6 dBsm at 12 GHz, and its RCS curve and the value of the common corner reflector are almost the same at 8 GHz. With no significant difference between the RCS curves of two frequency points, the performance of the new corner reflector meets the design requirements, thus providing a new approach for the countermeasure against the detection and identification of frequency conversion radar which works at the X band wave (8~12 GHz) to the corner reflector false target.

Key words: corner reflector; meta-material; absorbing RCS

角反射器是由相互垂直的金属面构成的刚性结构, 由于其特殊的几何结构, 能够对入射电磁波产生

收稿日期: 2013-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11204378, 11274389); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ8031)

基金项目: 祝寄徐(1989-), 男, 重庆荣昌人, 硕士生, 主要从事超材料以及角反射器研究。

E-mail: zhujixu601@163.com

多重内反射,产生强烈的后向雷达散射截面(Radar Cross Section,RCS),常用于构成假目标进行隐真示假,对主动发射电磁波并接收回波信号的武器和平台,如警戒雷达、炮瞄雷达等,有着良好的欺骗与诱偏作用。但传统角反射器有明显缺陷,其 RCS 强烈依赖入射波长,与入射波长的平方成反比,而实际目标的 RCS 曲线及雷达图像基本上与雷达的波长无关^[1-3]。超材料(Meta-materials)是近年来新发现的、电磁特性完全不同于常规材料的新型材料,它通常是人工设计的亚波长单元结构周期性组成、具有特殊的电磁波传播特性,如优良的带通、带阻特性,以及优异的空间滤波性等。超材料吸波体是指由超材料结构和介质基板组成的一类复合吸波材料。较之传统的吸波材料,超材料吸波体具有很多优势,例如:厚度薄、质量轻、吸收强、频带可调等^[4-5]。结合超材料吸波体的吸波性能,本文设计了金属贴片型超材料吸波体,有选择地让不同频率入射波的反射效率不相同,使角反射器在不同照射频率下产生近似相同的后向 RCS,对变频雷达的探测进行有效迷惑和干扰^[6-9],利用仿真软件 CST Microwave studio 进行计算与验证。

1 传统二面角反射器的 RCS 分析

二面角反射器结构见图 1,设平板 1 与平板 2 为长 a 宽 b 的平板,两平板的夹角为 2β ,当 $\beta=45^\circ$ 时,二面角的夹角为 90° ,入射波与反射波的夹角为 2φ 。本文研究中均认为二面角反射器的两平板之间的夹角为 90° , $a=b=200\text{ mm}$ 。

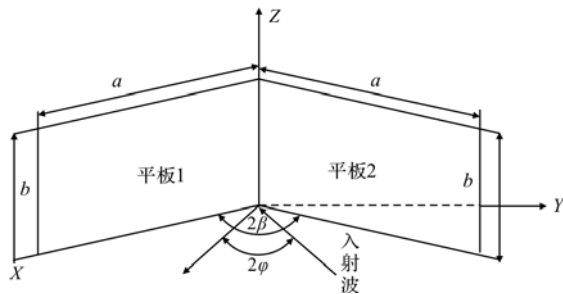


图 1 二面角反射器的几何关系
Fig. 1 Geometrical relationship of the dihedral corner reflector

分析二面角反射器的反射机理,其总 RCS 主要由 4 个单独散射组成:平板 1 的回波散射 S_1 ;平板 2 的回波散射 S_2 ;经 1 面反射到 2 面再返回的双重散射 S_{12} ;经 2 面到 1 面再回到雷达的双重散射 S_{21} 。因此,二面角反射器总的 RCS 可以表示为^[10-11]:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} |S_1 + S_2 + S_{12} + S_{21}|^2$$

当电磁波垂直于角反射器的对称轴入射时,角反射器产生的 RCS 最大。此时,角反射器在 8 GHz、11.5 GHz 与 12 GHz 这 3 个频点处的 RCS 曲线图,可通过仿真软件 CST Microwave studio,利用 FDTD 算法得到,具体见图 2~图 3。在 RCS 曲线图中,纵坐标表示 RCS 的大小;横坐标为入射波方向确定时(即入射波垂直于角反射器的对称轴入射)在 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 这一范围内的角度变化,用 θ 表示。图 4 为角反射器产生的 RCS 的分布情况。

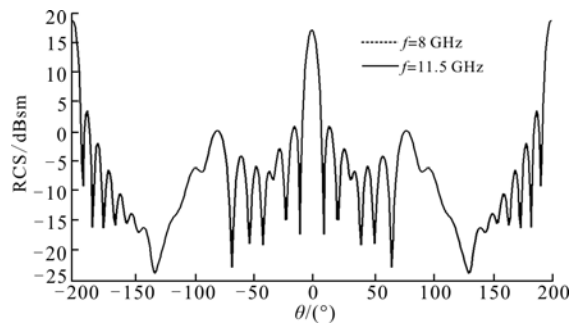


图 2 8 GHz 与 11.5 GHz 的 RCS 曲线对比
Fig. 2 The difference between the curves of RCS at 8 GHz and 11.5 GHz

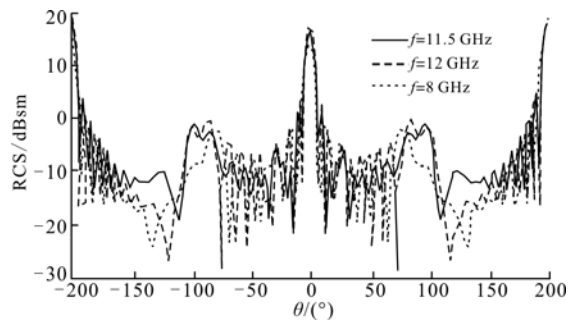


图 3 8 GHz 与 12 GHz 的 RCS 曲线对比
Fig. 3 The difference between the curves of RCS at 8 GHz and 12 GHz

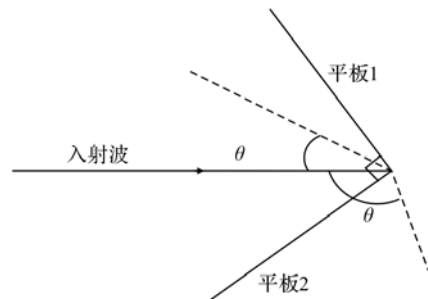


图 4 角反射器产生的 RCS 的分布情况
Fig. 4 The distribution of corner reflector of RCS

由图可知,传统的二面角反射器受到频率不同的电磁波照射时,产生不同的 RCS。在 8 GHz、11.5 GHz 与 12 GHz 这 3 个频点上,当入射波频率为 8 GHz 时,其中心 RCS 值约为 13.2 dBsm;当入射波频率为 11.5 GHz 时,其中心 RCS 值约为 15.2

dBsm;当入射波频率为 12 GHz 时,其中心的 RCS 值约为 16.8 dBsm,3 个频点所产生的 RCS 的值分别相差 2 dBsm 和 3.6 dBsm,相差较大,难以对抗变频雷达的探测。其中,RCS 曲线边缘部分的值也较大,这是因入射波产生边缘衍射而形成的。

2 新型二面角反射器 RCS 分析

2.1 超材料吸波体的单元结构设计

综合考虑单元结构的参数优化设计,最终的单元结构图见图 5。该单元结构共分 3 层,底层是铝质金属背板,中间层为 FR-4 的介质板,最上一层为铝质的方形贴片。 $L_x=L_y=2.40$ mm,单元结构周期为 $D_x=D_y=D=10.00$ mm,底层金属背板厚度为 $h_1=0.90$ mm,金属贴片的厚度为 0.017 mm,质板厚度为 $h_2=1.10$ mm,介电常数 $\epsilon_r=4.90$,介质层损耗的正切值为 0.025。

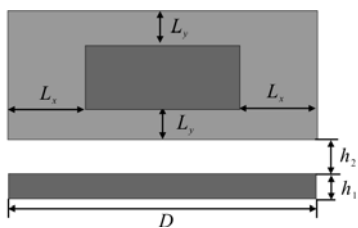


图 5 超材料结构单元图

Fig. 5 The magnitudes of structure unit of meta-material

为探索有效对抗工作在 X 波段(8~12 GHz)的变频雷达的探测的方法,文中设计的超材料吸波体在这一频段的吸波能力逐渐增强,在 8 GHz 这一频点处,吸收率为 0,形成了全反射,在 11.5 GHz 这一频点,反射率约为 79.6%,也可表示为 -2 dBsm,在 12 GHz 这一频点处,反射率约为 66.8%,也可表示为 -3.6 dBsm,见图 6。又因为本文设计的超材料吸波体结构单元共有 3 层,其中底层是金属板,电磁波最终被金属板全反射回去,则该结构的 S_{21} 曲线为 0,可认为没有产生透过的波,在描述该结构单元的传输特性曲线时,只需 S_{11} 曲线即可表达完整。

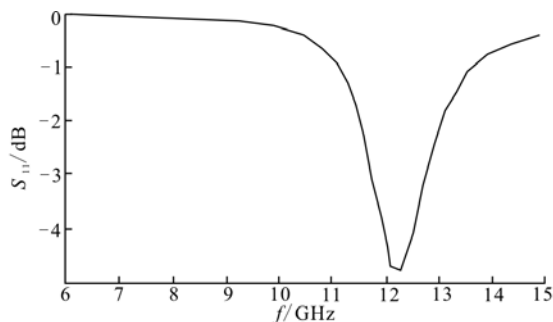


图 6 超材料单元的传输特性曲线

Fig. 6 The transmission curve of unit of meta-material

2.2 结果验证

由上文公式,结合超材料吸波体的吸波性能,利用仿真软件 CST Microwave studio,对该新型角反射器的性能进行计算与验证。

从图 7~图 9 可以看出,角反射器加载超材料吸波体后,RCS 性能表现稳定,在 8 GHz 这一频点上,角反射器的 RCS 几乎没有变化;在 11.5 GHz 与 12 GHz 这 2 个频点,角反射器的 RCS 值则有效减小,在超材料吸波体的作用下,与 8 GHz 时产生的 RCS 几乎一致,达到了预期的设计目标。

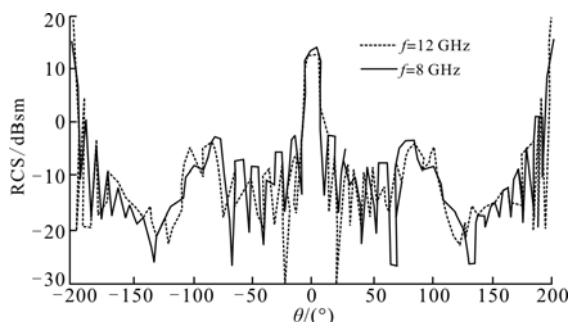


图 7 新结构 8 GHz 与 12 GHz 的 RCS 曲线对比

Fig. 7 The difference between the curves of RCS at 8 GHz and 12 GHz(new structure)

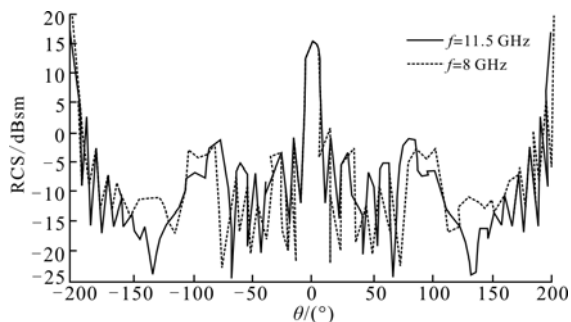


图 8 新结构 8 GHz 与 11.5 GHz RCS 曲线对比

Fig. 8 The difference between the curves of RCS at 8 GHz and 11.5 GHz(new structure)

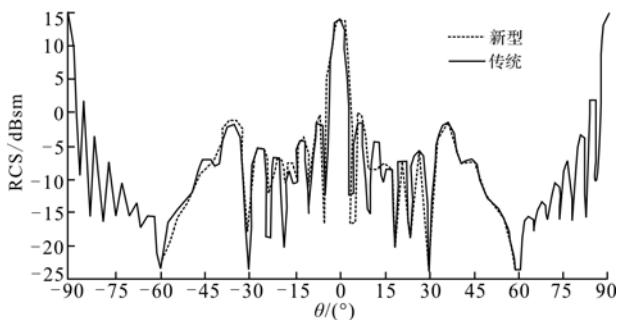


图 9 2 种类型的角反射器在 8 GHz 时的 RCS 曲线对比

Fig. 9 Comparison of different corner reflector's RCS curves at 8 GHz

3 结语

本文设计了一种加载超材料吸波体的二面角反射器,对角反射器的 RCS 进行计算,再利用仿真软件 CST Microwave Studio 的 FDTD 算法进行测试与验证。结果表明:这种新型的二面角反射器,有效克服了传统角反射器的缺点,在超材料吸波体的作用下,在 8 GHz、11.5 GHz 以及 12 GHz 这 3 个频点,其 RCS 值大小一致,RCS 曲线几乎完全重合,可有效对抗变频雷达对角反射器假目标的探测与识别,具有较高的实际应用价值。在下一步的工作中,除在角反射器表面尝试加载优化设计的超材料吸波体,也尝试将角反射器的各面从现在的普通金属平面改为频率选择表面,在扩宽新型角反射器的工作频段的同时,也增加新型角反射器的类型。

参考文献(References):

- [1] 宋如华,乐时晓,吕百达.两面角反射器谐振腔的基本性质[J].激光杂志,1998,10(4):145-149.
SONG Ruhua, LE Shixiao, LÜ Baida. Fundamental of characteristics of corner resonator[J]. Laser journal, 1998, 10(4): 145-149. (in Chinese)
- [2] 黄培康,殷红成,许小剑.雷达目标特性[M].北京:电子工业出版社,2005:25-32.
HUANG Peikang, YIN Hongcheng, XU Xiaojian. Radar target characteristics [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2005: 25-32. (in Chinese)
- [3] Xin Jianshan, Jing Yuanyin, Dan Linyu, et al. Analysis of artificial corner reflector's radar cross section: a physical optics perspective[J]. Arab journal geosci, 2012, 12(4): 582-592.
- [4] 王斌科,王新华,顾超,等.二维圆柱超材料隐身罩的设计与测试 [J].空军工程大学学报;自然科学版,2010,11(1):78-81.
WANG Binke, WANG Xinhua, GU Chao, et al. The design and measurement of two-dimensional cylinder metamaterial cloak [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(1): 78-81. (in Chinese)
- [5] 顾超,屈绍波,裴志斌,等.不规则多棱柱隐身罩材料参数的一般张量表达式[J].空军工程大学学报;自然科学版,2010,11(5):86-89.
GU Chao, QU Shaobo, PEI Zhibin, et al. General expressions of constitutive tensors of irregular prism cloaks[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(5): 86-89. (in Chinese)
- [6] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical review letters, 1996, 76(25): 4773-4776.
- [7] Baena Juan D, Ricardo Marque's, Francisco Medina, Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators[J]. Physical review B, 2004, 18(9): 014402:01-05.
- [8] Knott E F. RCS reduction of dike at corner[J]. IEEE trans AP, 19989(5):406-408.
- [9] Gdesser T, BaLanls C A. Backscatter analysis of dihednd corner reflectors using physical optics and the physical theory of differaction [J]. IEEE trans AP, 1997, 10(3-9):1137-1147.
- [10] 李敬,武哲,李天.弹翼角反射器效应的雷达散射截面分析[J].北京航空航天大学学报,1998,20(5):25-30.
LI Jing, WU Zhe, LI Tian. RCS analysis of bob-fins [J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 1998, 20(5):25-30. (in Chinese)
- [11] 马东立,武哲.机翼涂敷吸波材料减缩雷达散射截面的研究[J].航空学报,2000,21(3):241-243.
MA Dongli, WU Zhe. Study on reduction of RCS by coating radar absorbing material formetal wings[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2000, 21(3): 241-243. (in Chinese)

(编辑:徐敏)