

基于电阻型频率选择表面吸波体的低雷达 散射截面微带天线设计

随 赛¹, 常红伟¹, 马 华¹, 庞永强², 王甲富¹, 屈绍波¹

(1 空军工程大学理学院, 西安, 710051; 2 西安交通大学电子与陶瓷教育部重点实验室, 西安, 710049)

摘要 基于拓扑优化方法设计了一种轻质、宽带、大入射角的频率选择表面吸波体, 并将其应用于微带天线以缩减雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)。吸波体在 6.3~20 GHz 频段内的吸收率大于 90%, 并且在 TE 和 TM 两种极化下, 当入射角增加至 50° 时仍保持在 80% 以上。将该吸波体以盖板形式加载到微带天线, 在保证天线原有辐射特性不变的情况下, 天线 RCS 的缩减在 6.3~20 GHz 频带内大于 3 dBsm, 在 10.6~12 GHz 频带(天线工作频段: 10.37~10.90 GHz)内大于 10 dBsm。此外, 由于选用泡沫材料作为基体, 密度仅为 0.35g/cm³, 加载微带天线后增重很小。实验结果证明: 与加载其他吸波材料的低散射截面微带天线相比, 该微带天线不仅具有宽带 RCS 缩减特性, 还具有重量小的优势。

关键词 超材料; 拓扑优化; RCS 缩减; 微带天线

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.01.009

中图分类号 V243.2; TN820 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)01-0046-05

A Design of Meta-material Absorber Based on Topology Optimization of Low-RCS Microstrip Antenna with Resistance Frequency Selective Surface

SUI Sai¹, MA Hua¹, CHANG Hongwei¹, PANG Yongqiang², WANG Jiafu¹, QU Shaobo¹

(1. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the topology optimization and genetic algorithm (GA), a kind of meta-material absorbers with wide-band, polarization-insensitive and light-weight is proposed and applied to radar cross section (RCS) reduction of antennas by using resistive frequency selective surface (RFSS). Specific absorption of absorbers in range of frequency band 6.3~20 GHz is greater than 90% and this can remain above 80% when the incident angle increases to 50° under conditions of TE and TM polarization-independent. The absorber is loaded to the microstrip antenna with a cover plate form, and the reduction of antennas RCS is greater than 3 dBsm in range of frequency band 6.3~20 GHz, and is greater than 10 dBsm in range of fre-

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61331005, 11204378, 11274389); 中国博士后科学基金(2013M532131); 全国优秀博士论文作者专项(201242)

作者简介: 随 赛(1993-), 男, 安徽亳州人, 硕士生, 主要从事新型电磁材料与器件研究. E-mail: suisai_mail@foxmail.com

引用格式: 随赛, 常红伟, 马华, 等. 基于电阻型频率选择表面吸波体的低雷达散射截面微带天线设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(1): 46-50. SUI Sai, MA Hua, CHANG Hongwei, et al. A Design of Meta-material Absorber Based on Topology Optimization of Low-RCS Microstrip Antenna with Resistance Frequency Selective Surface[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(1): 46-50.

quency band 10.37~10.90 GHz under conditions that the original radiation characteristic of antennas is unchanged. As an application example of this absorber, a low-RCS microstrip patch antenna is designed by mounting the absorber on substrate of the antenna. The RFSS absorber is made of carbon films attached on light-weight foam. The area density is only 0.35 g/cm³. The microstrip antenna designed is low RCS, light-weight, and low-profile, and such antennas possess importance application values in stealthy technologies.

Key words: meta-materials; Topology optimization; RCS reduction; microstrip antenna

近年来,超材料完美吸波体作为一种新型的吸波材料已被应用到雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的缩减中,天线的 RCS 缩减就是其中之一。Volakis 和 Pan 等采用分布式填充和集总原件吸波材料的方式实现 RCS 的缩减^[1-2];Zhao 等采用分型结构完美吸波体实现天线带内(窄带)的 RCS 缩减^[3]。但目前最常见的超材料基于谐振机制,其性能主要由结构类型、结构参数和组份材料的性质决定,由于结构类型的多样性以及材料性质对结构参数的敏感性,超材料的设计仅仅依赖简单的物理模型和经验是不够的^[4-9]。因此,借助某种成熟的优化算法,对结构及其参数进行优化设计已经成为超材料设计和应用研究的重要途径^[10-16]。拓扑优化通过特定编码,借助优化算法进行相应的演化,克服了仅依赖人的经验和简单结构模型等主观性较强的方法的缺点,拓宽了超材料设计的寻优能力。

但由于集总原件吸波材料加工繁琐、工艺要求高,完美吸波体仅能对带内 RCS 进行缩减(带外缩减还需采用其他手段,如频率选择表面天线罩等)。本文根据超材料拓扑优化的设计方法,设计一种基于电阻型频率选择表面(resistance frequency selective surface, RFSS)的超材料吸波体^[11-14],并应用到缩减微带天线 RCS 中。

1 吸波材料的拓扑设计及优化

1.1 电阻型频率选择表面吸波体拓扑及编码设计

根据电阻型频率选择表面的设计方法,设计了一种轻质、宽带单层吸波体,结构见图 1(a)。在加载金属背板的介质基体(聚氨酯泡沫, $\epsilon = 1.2$) 上用二进制编码的方式设计拓扑结构,结构采用电阻型频率选择表面实现。通过拓扑编码将拓扑形状离散化,将单元表面划分为 $M \times M$ 像素点,用 1 和 0 分别表示相应位置有无相应方形贴片,编码长度为 $M \times M$ 。由于采用中心对称的二进制编码,可将编码区域缩小,相应码长度缩短为 $(M \times M)/8$;通过参数编码将单元的结构参数(周期性单元结构的大小 p 、基板厚度 h 、缝隙宽度 w 、电阻片方阻值 r 进行离散化二进制编码,码长为 N , 编码见图 1(b)。

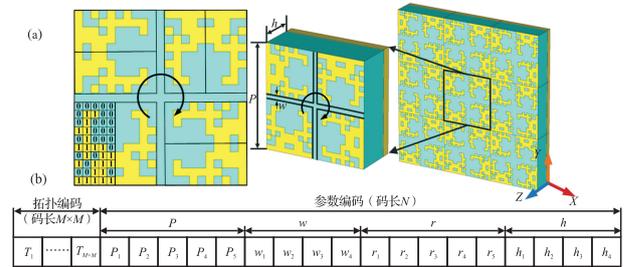


图 1 拓扑优化编码示意图

Fig.1 The sketch of coding method of topology optimization design

根据中心对称原则形成相应的拓扑形状,编码长度为 $(M \times M)/8 + N$ 。参数编码的解码过程为:

$$p = p_{\min} + 2^{N_1-i} S_1 \sum_{i=1}^{N_1} p_i; \quad w = w_{\min} + 2^{N_2-i} S_2 \sum_{i=1}^{N_2} w_i; \\ r = r_{\min} + 2^{(N_3-i)} S_3 \sum_{i=1}^{N_3} r_i; \quad h = h_{\min} + 2^{(N_4-i)} S_4 \sum_{i=1}^{N_4} h_i \quad (1)$$

式中: p_i, w_i, r_i, h_i 为对应位置的二进制编码; $S_1 \sim S_4$ 为最小海明码距离对应的数值(即倍数); $p_{\min}, w_{\min}, r_{\min}, h_{\min}$ 是为保证单元结构参数合理性而设置的最小值; $N_1 \sim N_4$ 为对应参数编码的最大长度。

根据超材料吸波体设计经验,本文给出了结构参数的经验值:

$$\begin{cases} p = (16p_1 + 8p_2 + 4p_3 + 2p_4 + p_5) \times 0.25 + 4 \\ w = (8w_1 + 4w_2 + 2w_3 + w_4) \times 0.1 \\ r = (16r_1 + 8r_2 + 4r_3 + 2r_4 + 5r_5) + 30 \\ h = (8h_1 + 4h_2 + 2h_3 + h_4) \times 0.2 + 1 \end{cases} \quad (2)$$

这种编码方式一方面同时考虑了超材料单元的拓扑信息和结构参数信息,更加有利于优化设计的整体性;另一方面,采用中心对称的编码方式,使得编码长度大大缩短,在降低编码难度的同时也有利于优化算法的快速收敛;同时由于采用了对称式的编码方法,保证了设计对象对入射电磁波的极化不敏感特性,这种对称式的结构同样适用于对极化不敏感的超材料的设计。

1.2 联合仿真优化系统

遗传算法因具有良好的全局搜索能力被广泛应用到超材料优化设计中,本文利用电磁仿真软件 CST 提供的 VBA 接口与 MATLAB 进行联合编

程^[9-10],实现了一种联合仿真系统。首先产生一个固定长度的二进制编码,然后通过VBA接口调用并将数据传递给CST,并计算相应结构的适应度函数值,最后由主程序完成相应的优化算法的操作,流程见图2。遗传算法相关参数设置如下:锦标赛式选择;随机多点交叉,概率为0.8;变异概率为0.05;初始种群为50。

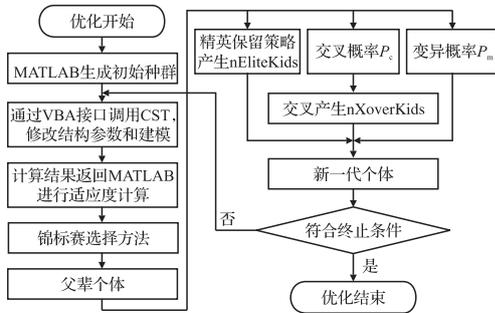


图2 MATLAB和CST联合优化仿真流程图
Fig.2 The flow chart of combined optimization system of MATLAB and CST

1.3 优化及仿真结果

遗传算法优化结果见图3。

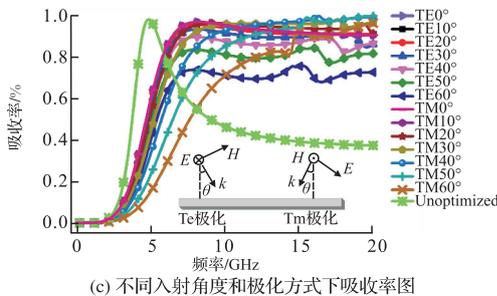
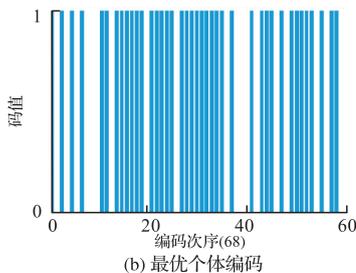
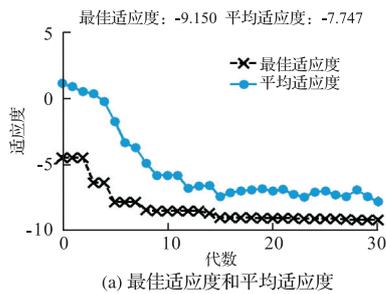


图3 优化计算结果

Fig.3 Simulation results of optimization procedure

从图中可知优化后的吸波体吸收率90%以上的带宽相对于优化前结构的吸收率得到明显拓宽,

带宽拓宽为-20~6.3 GHz。仿真结果显示,在TE和TM 2种极化方式下具有良好的角度稳定性,当入射角增加至50°时,该吸波体仍能保持80%以上的吸收率。

2 低 RCS 微带天线设计

2.1 天线及 RCS 缩减结构设计

采用联合仿真系统,优化设计了一款微带天线:尺寸为 $W \times L = 10.9 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm}$ 的矩形贴片置于边长为 $p = 47.4 \text{ mm}$ 、 $h = 0.8 \text{ mm}$ 的方形F4B介质基板上,天线采用同轴接头背馈式激励,馈电位置偏离Y轴原点2.1 mm。

此微带天线工作在10.6 GHz。将设计好的电阻型频率选择表面吸波体中间掏空作为盖板覆盖在微带天线的顶部,结构见图4。

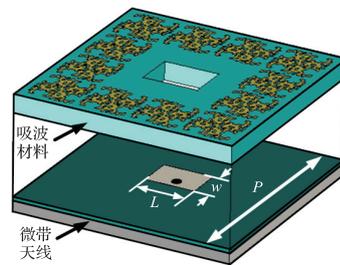


图4 加载RFSS的天线结构示意图

Fig.4 The schematic diagram of antenna with RFS

采用这种开窗式结构,一方面是为了不影响天线的辐射特性,另一方面为了在最大程度上保证超材料吸波体的吸收效率,从而保证在不影响天线原有工作特性的条件下实现RCS的宽频带缩减。

2.2 仿真结果及对比

利用CST分别仿真了加载吸波体前后天线的S参数和辐射方向图,并将结果进行了对比分析。见图5。

通过天线加载吸波材料前后 S_{11} 的对比,发现添加吸波体前后天线的工作频点未发生偏移,-10 dB带宽为530 MHz(10.37~10.90 GHz),中心谐振频点为10.6 GHz(见图5(a));通过天线加载聚氨酯泡沫板和吸波材料的辐射方向图对比,添加吸波体后天线E面的辐射特性基本未发生变化,H面辐射方向性略微增强(见图5(b)),分析认为可能是超材料吸波体的局域作用使辐射方向性增强;图5(c)给出了加载超材料吸波体前后天线主极化和交叉极化的方向图,天线加载吸波体前后极化方向图基本一致且主极化和交叉极化相差120 dB,即加载吸波体未对原天线的极化方式产生影响。

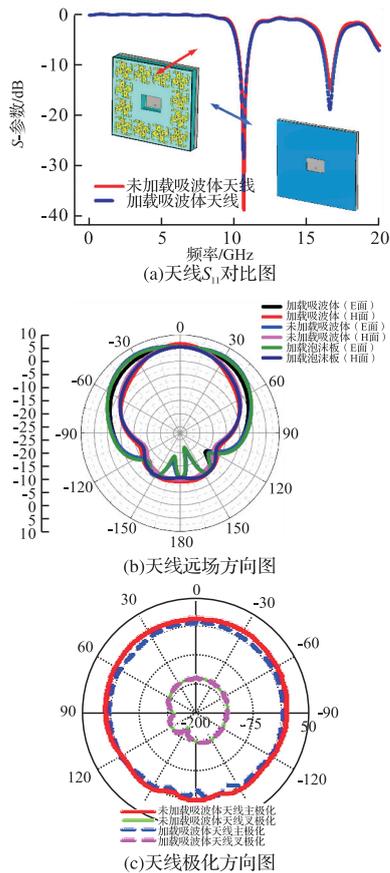


图 5 天线性能仿真结果

Fig.5 The radiation simulation result of antenna

图 6(a) 给出了不同极化波下天线的单站 RCS 缩减的仿真结果,可以看出,加载电阻型吸波体后,不管在 TE 和 TM 极化波下,天线的 RCS 缩减 3 dBsm 以上的带宽均约为 13.7 GHz (6.3 ~ 20.0 GHz),不仅覆盖了天线的工作频带(10.37 ~ 10.90 GHz),而且在天线工作频带外也实现了宽频域大幅度的缩减,最大缩减值达 12.5 dBsm (12.0 GHz 处)。而在天线的工作频带内,均有 10 dB 以上的缩减。图 6(b) 给出了天线工作频率 10.6 GHz 处的单站 RCS 的缩减情况,由图可知:在 $-55^\circ \sim 55^\circ$ 角域内单站 RCS 均有大幅缩减,也验证了所设计吸波体的宽入射角吸波特性。

2.3 实验验证

为验证设计结果,我们通过发泡工艺,将制备的泡沫基体打磨至 3.6 mm;通过丝网印刷技术在基体上印出满足方阻值要求的电阻片图案,得到设计的电阻型频率选择表面吸波体;通过激光刻蚀技术加工设计尺寸的天线。在微波暗室中,利用矢量网络分析仪(Anritsu MZ7808A)测量天线的 S 参数;采用自由空间法测量天线的辐射方向图和 RCS 特性。测试结果见图 7~8。

由图 7(a) 可以看出,加载吸波体前后,天线的实测工作频带和仿真的基本吻合,中心频点偏离仿真 70 MHz,这主要是因为基板介电常数与仿真存

在差异。图 7(b) 实测了天线的 E 面和 H 面辐射方向图,由图可知,加载吸波体前后天线的实测方向图基本一致,与仿真基本吻合。测试曲线的抖动主要是因为测量环境的误差造成。由于天线整体尺寸较小,考虑到测量系统精度,把待测天线放置在距喇叭天线 0.65 m 处,此时入射波可近似看作平面波。由于实验条件限制,本文仅测量了 7~13 GHz 内的 RCS。从图 8 中可见,加载吸波体后天线的 RCS 在 7~13 GHz 下降达 3 dBsm 以上,实测结果验证了宽频带内天线 RCS 减缩效果。图中曲线的抖动主要因为测试条件不完备。

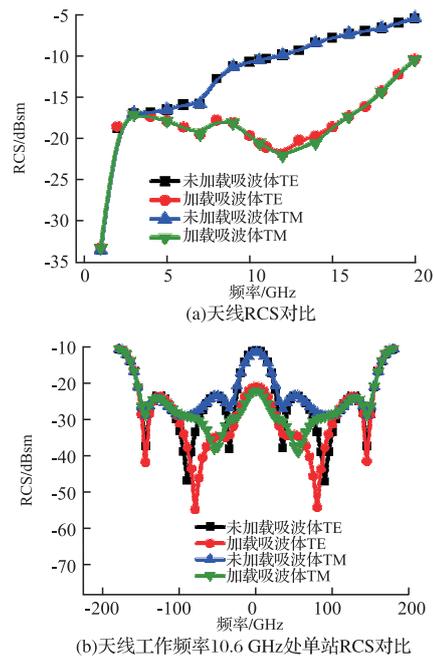


图 6 雷达散射截面仿真结果

Fig.6 The simulation result of RCS

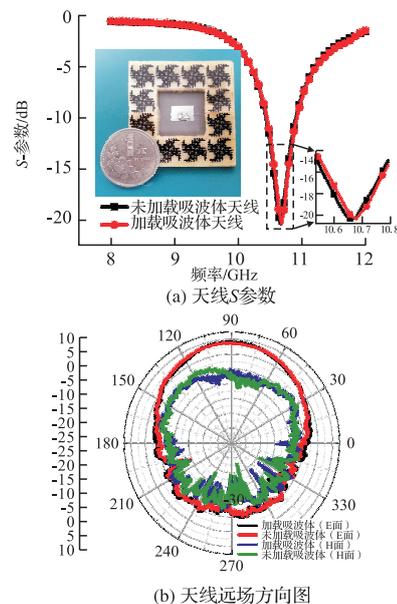


图 7 天线性能测试图

Fig.7 The tested result of designed antenna

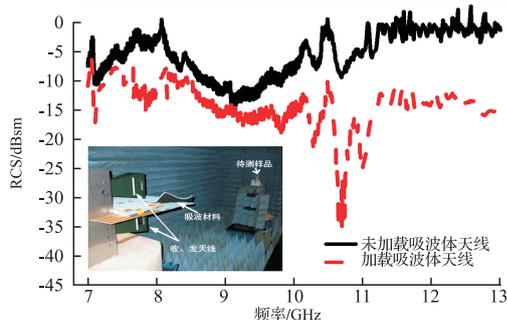


图8 天线 RCS 测试图

Fig.8 Measured RCS

3 结语

利用电阻型频率选择表面吸波体设计灵活性高的特点,采用拓扑优化的设计方法,设计了一种低 RCS 微带天线。首先通过建立一种联合仿真系统,利用遗传算法设计并优化了一种 2 层结构的轻质、宽频带、大角度稳定、极化无关的吸波体,该吸波体可以通过发泡工艺和丝网印刷技术制得。进而设计了一款微带天线,并将微带天线和吸波体结合,实现了微带天线的宽带 RCS 缩减。仿真结果和实验结果均证明,加载超材料吸波体的天线,在不改变原有辐射特性的前提下具有宽带 RCS 缩减的功能。同时本文提出的拓扑优化设计方法,具有可迁移性,可以应用到频率选择表面、电磁带隙结构等其它超材料的优化设计中。

参考文献(References):

- [1] J L Volakis, A Alexanian, J M Lin. Broadband RCS Reduction of Rectangular Patch by Using Distributed Loading[J]. Electron Lett, 1992, 28(25): 2322-2323.
- [2] W Jiang, Y Liu, S Gong, et al. Application of Bionics in Antenna Radar Cross Section Reduction [J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2009, 8: 1275-1278.
- [3] 孙良奎,程海峰,周永江,等.一种基于超材料的吸波材料的设计与制备[J].物理学报, 2011, 60(10): 10108901. SUN Liangkui, CHENG Haifeng, ZHOU Yongjiang, et al. Design and Preparation of a Radar-absorbing Material Based on Metamaterial [J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(10): 10108901. (in Chinese)
- [4] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures[J]. Physical review letters, 1996, 76(25): 4773.
- [5] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.
- [6] Grady N K, Heyes J E, Chowdhury D R, et al. Terahertz Metamaterials for Linear Polarization Conversion and Anom-

- alous Refraction[J]. Science, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [7] H Li Ultrathin Multiband Gigahertz Metamaterial Absorbers [J]. J Appl Phys, 2011, 110: 014909.
- [8] S Gu, J P Barrett, T H Hand, et al. A broadband Low-reflection Metamaterial Absorber [J]. J Appl Phys, 2010, 108: 064913.
- [9] Y H Liu, S Gu, C R Luo, et al. Ultra-thin Broadband metamaterial Absorber[J]. Appl Phys A, 2012, 108: 19-24.
- [10] Michielssen E, Sajer J M, Ranjithan S, et al. Design of Lightweight, Broad-Band Microwave Absorbers Using Genetic Algorithms[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6): 1024-1031.
- [11] Cui S, Weile D S, Volakis J L. Novel Planar Electromagnetic Absorber Designs Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(6): 1811-1817.
- [12] Kova'cs P, Raida Z, Lukes Z. Design and Optimization of Periodic Structures For Simultaneous EBG and AMC Operation [C]//The 15th International Conference on Microwave Techniques (COMITE). IEEE, 2010: 195-198.
- [13] Pang Y Q, Cheng H F, Zhou Y J, et al. Analysis and Enhancement of the Bandwidth of Ultrathin Absorbers Based on High-impedance Surface[J]. J Phys D, Appl Phys, 2012, 45(21): 215104.
- [14] 屈绍波,王甲富,马华,等.超材料设计及其在隐身技术中的应用[M].北京:科学出版社,2013:237-261. QU Shaobo, WANG Jiafu, MA Hua, et al. Metamaterial Design and Applications in Stealth Technology[M]. Beijing: Science Press, 2013: 237-261. (in Chinese)
- [15] 常红伟,马华,屈绍波,等.遗传算法在超材料优化设计中的应用及实现[J].空军工程大学学报:自然科学版, 2014, 15(3): 89-92. CHANG Hongwei, MA Hua, QU Shaobo, et al. A Design and Realization of Optimization of Meta-material Based on Genetic Algorithm [J]. Journal of Air Force Engineering University, Natural Science Edition, 2014, 15(3): 89-92. (in Chinese)
- [16] 常红伟,马华,张介秋,等.基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计[J].物理学报, 2014, 63(8): 087804. CHANG Hongwei, MA Hua, ZHANG Jieqiu, et al. Optimization of Metamaterial Based Weighted Real-coded Genetic Algorithm[J]. Acta Phys Sin, 2014, 63(8): 087804. (in Chinese)

(编辑:徐敏)