

一种新型频率选择表面及其在天线雷达散射截面减缩中的应用

路宝 龚书喜 凌劲 王文涛

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 为了减缩天线的雷达散射截面, 该文提出一种新型带阻频率选择表面结构(FSS)。对于入射电磁波, 该结构与传统方环结构相比具有窄阻带和宽通带特性。因此该结构能代替天线的传统金属地板从而减缩天线的结构项雷达散射截面(RCS)。仿真与测试结果表明该结构作为天线地板可很大程度的减缩天线的雷达散射截面。

关键词: 雷达散射截面; 频率选择表面; 雷达散射截面减缩; 地板

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0199-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00046

A Novel Frequency Selective Surface Structure and Its Application to RCS Reduction of Antennas

Lu Bao Gong Shu-xi Ling Jin Wang wen-tao

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A novel stop-band FSS structure which is used to reduce the RCS of antenna is presented in this paper. For incident waves, the proposed structure has narrow stopband and wide pass band. Hence, the conventional metallic ground plane can be replaced with the proposed FSS to reduce the RCS of antenna. Simulated and experimental results show that the RCS of antenna is reduced considerably with the proposed FSS ground plane.

Key words: Radar Cross Section (RCS); Frequency Selective Surfaces (FSS); Radar Cross Section Reduction (RCSR); Ground plane

1 引言

频率选择表(FSS)面是一种 2 维周期阵列结构, 可看作是一种空间滤波器。通常有两种形式, 贴片型和孔径型。对于谐振情况下的入射电磁波, 这两种阵列分别呈现带阻和带通特性。在天线雷达散射截面(RCS)减缩中, 一般用孔径型 FSS 作为天线的雷达罩滤除带外入射电磁波, 从而减少天线工作频带外的 RCS 法^[1-7]。但是贴片型 FSS 很少应用在天线的 RCS 减缩中。

许多种天线例如单极子天线; 偶极子天线; 微带贴片天线等都需要金属板作为地板来提高其辐射增益。但是, 由于对电磁波的理想反射特性, 金属地板会反射绝大部分入射电磁波能量, 从而增加天线的 RCS。基于以上原因, 本文提出应用带阻型 FSS 来代替传统的金属地板。当天线工作在 FSS 的阻带内时, FSS 与金属地板的作用相同, 反射入射波能量来增加天线增益。在天线的工作频带外, 由于 FSS 的通带特性, 它使入射波能量穿过天线, 从而减少天线的后向散射。因此, 该方法可在很大程度上减少天线的 RCS。

为了验证该方法, 本文设计了一种新型 FSS, 并将其应用在微带偶极子天线上, 仿真和实验结果

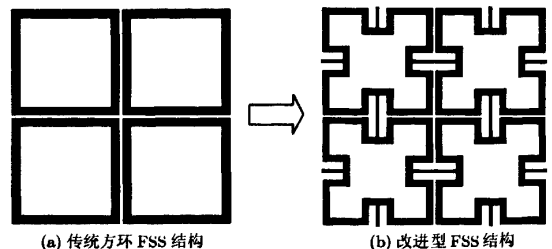
表明当用该新型 FSS 作为天线的地板时, 天线的辐射特性与金属地板相比无较大变化, 但是其 RCS 却有很大程度的减缩。因此证实了该方法的正确性。

2 带阻型 FSS 的设计

图 1 所示为传统和改进型频率选择表面的结构示意图。他们可等效为如图 2 所示的集总参数的等效电路模型法^[8]。当入射平面波照射到 FSS 表面时, 传统 FSS 结构中金属方环之间的缝隙产生电容 C 而其金属环形成电感 L 。因此, 其谐振频率为

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

但是该结构一般具有很宽的阻带, 这会使 FSS 过多地反射天线工作频带外的入射电磁波能量从而增加天线带外 RCS。基于此原因, 为了减少其阻带带宽,



(a) 传统方环 FSS 结构

(b) 改进型 FSS 结构

图 1 频率选择表面结构示意图

2009-01-15 收到, 2009-06-29 改回

通信作者: 路宝 lubao@mail.xidian.edu.cn

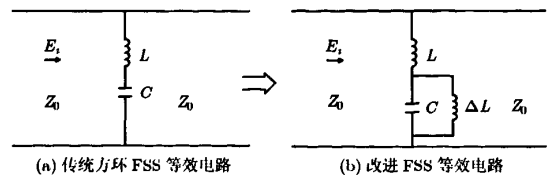


图 2 频率选择表面等效电路图

我们在金属方环的四壁引入并联枝节，该金属枝节给传统结构引入了如图 2(b)所示的并联电感 ΔL ，因此其谐振频率为

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}} \tag{2}$$

其中

$$L' = L \cdot \frac{1}{1 + (L/\Delta L)} \tag{3}$$

由式(3)可看出,改进 FSS 的等效电感 L' 比传统 FSS 的等效电感 L 小。由于 FSS 的带宽与 $\sqrt{L/C}$ 成正比法^[9]，所以改进型 FSS 将比传统的 FSS 具有更窄的阻带带宽。

基于上述理论方法，本文设计了谐振频率为 3 GHz 的新型 FSS 结构，如图 3 所示。其具体尺寸为： $d=17.5\text{ mm}$, $g=0.5\text{ mm}$, $s=1\text{ mm}$, $c=5\text{ mm}$, $p=18\text{ mm}$, $b=0.5\text{ mm}$, $d=17\text{ mm}$, $t=3.75\text{ mm}$ ，介质基板

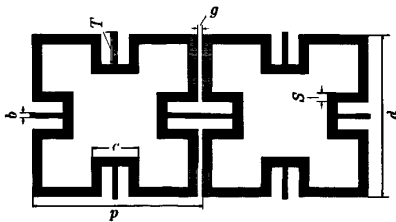


图 3 改进型 FSS 结构尺寸

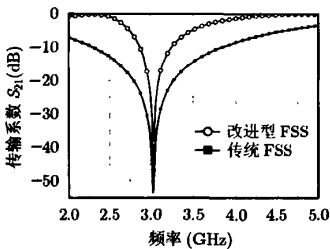


图 4 传统 FSS 与改进 FSS 传输特性仿真结果

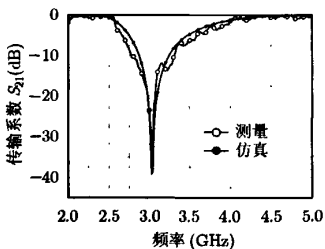
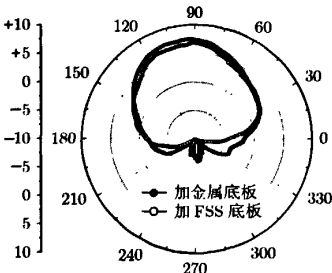


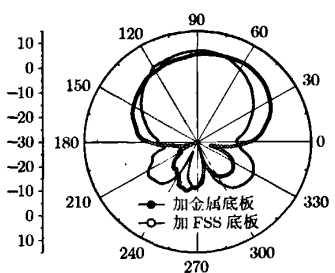
图 5 改进型 FSS 传输特性仿真和测量结果



图 6 加改进型 FSS 地板的微带偶极子天线



(a) E 面方向图



(b) H 面方向图

图 7 天线加金属地板与 FSS 地板实测方向图

的厚度为 $h=1.5$ ，介电常数 $\epsilon_r=6$ 。图 4 给出了传统方环 FSS 和改进型 FSS 的仿真传输特性。由仿真结果可知，传统 FSS 的 -10 dB 阻带带宽为 50%，而改进型 FSS 阻带带宽仅为 13%。因此通过加入金属枝节，改进型 FSS 的阻带带宽明显减小。为了验证仿真结果的正确性，我们在微波暗室中测量了改进型 FSS 的传输特性。图 5 给出了测量和仿真的传输特性。图中可以看出仿真和测量值吻合良好。

3 FSS 地板对天线辐射特性的影响

本文把改进型 FSS 结构作为一个微带偶极子天线的地板，如图 6 所示。偶极子天线的中心工作频率为 3 GHz，当 FSS 的阻带设计在天线工作频带内时，FSS 地板会反射入射电磁波能量从而起到与金属地板相同的作用。但是在用新型 FSS 地板代替天线金属地板时，首先必须保证该结构对天线的辐射特性不能有较大影响。因此在中心工作频率 3 GHz，我们分别测量了该天线用相同尺寸的 FSS 地板和金属地板的辐射方向图。测量所得 E 面和 H 面方向图如图 7 所示，可以看出用 FSS 地板代替金属地板后，天线的辐射特性并没有较大的变化。因此证实了在天线的工作频带内 FSS 作为地板与金属地板的作用相同。所以完全可以用该 FSS 结构作为天线的地板而不会影响天线的辐射性能。

4 FSS 地板在天线 RCS 减缩中的作用

上节证实了在天线的辐射特性无大的变化情况下 FSS 地板可以代替金属地板。本节研究该 FSS 地板对天线 RCS 的影响。当入射波频率在天线的工作频带外，金属地板由于其对电磁波能量的理想反射特性而反射回大部分电磁波能量；相反，由于 FSS 地板此时的通带特性，入射波会穿过天线从而减少反射回电磁能量。因此，用 FSS 地板将会大大减少天线的 RCS。

仿真和测量结果也证实了以上的分析。图 8(a)给出了垂直入射时天线用 FSS 和金属地板的单站 RCS 在 1-10 GHz 频段内的仿真结果。可看出对于垂直入射情况，加 FSS 地板天线的单站 RCS 在带外有很大幅度的减缩，其中在 2.2 GHz 有 22 dBsm 的最大减缩量。由于在天线工作频带内 FSS 与金属地板作用相同，所以 RCS 并没有减缩。图 8(b)所示的测量结果证实了仿真结果的准确性。

斜角度入射时的天线 RCS 是天线散射特性的重要部分，因此还要研究斜入射时 FSS 对天线 RCS

的减缩情况。为此我们分别仿真了入射角为 $\theta = 30^\circ$ ， $\phi = 45^\circ$ 和 $\theta = 60^\circ$ ， $\phi = 45^\circ$ 时天线的单站 RCS。图 9(a)给出了入射角为 $\theta = 30^\circ$ ， $\phi = 45^\circ$ 时天线的单站 RCS。可看出，在很宽的频带内天线加 FSS 地板的单站 RCS 都得到了明显的减缩，只有在相对较窄的一个频带内有所增加。当入射角度为 $\theta = 60^\circ$ ， $\phi = 45^\circ$ 时，从图 9(b)可清楚地看到，天线加 FSS 地板的单站 RCS 几乎在整个频段内都得到了很大程度的减缩。只有在 7 GHz 和 9.3 GHz 附近有所增加。而最大的减缩幅度是在 5.1 GHz 达到 12 dBsm。

5 结束语

本文在传统方环型频率选择表面结构的基础上，通过加金属枝节使其阻带带宽明显减小。应用改进型 FSS 的窄阻带特性，将其作为微带偶极子天线的地板来减缩天线的 RCS。仿真和实验结果证明在不影响天线辐射特性的情况下，应用改进型 FSS 作为天线的地板可以很大程度上减缩天线垂直入射和斜入射时的单站 RCS。

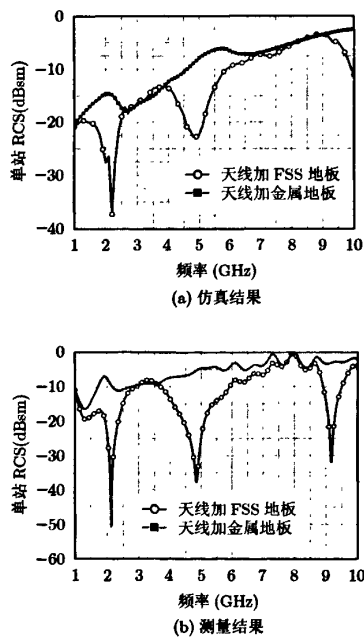


图 8 垂直入射时天线的单站 RCS 仿真和测量结果

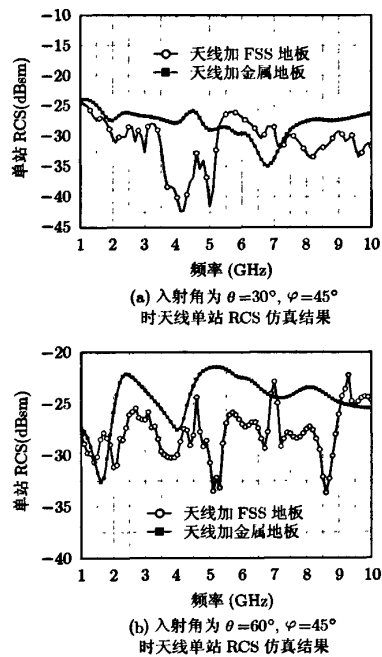


图 9 斜入射时天线的单站 RCS 仿真结果

参 考 文 献

[1] Gerini G and Zappelli L. Multilayer array antennas with integrated frequency selective surfaces conformal to a circular cylindrical surface. *IEEE Transactions on Antenna*

[2] Varadan V V. Radar absorbing applications of metamaterials. *IEEE Region 5 Technical Conference, Fayetteville, AR, United states*, 2007: 105-108.

Propagation, 2005, 53(6): 2020-2030.

- [3] Luo Guo-qing, Hong Wei, Tang Hong-jun, and Yin Xiao-xin. Filtenna consisting of horn antenna and substrate integrated waveguide cavity FSS. *IEEE Transactions on Antenna Propagation*, 2007, 55(1): 92-98.
- [4] Mackay A J. The theory and design of provably optimal bandwidth radar absorbent materials (RAM) using dispersive structures and/or frequency selective surfaces (FSS). ICEAA, Torino, Italy, 2007: 157-160.
- [5] Mittra R and Lee D. Analysis of a frequency selective surface (FSS) radome located in closed proximity of a phased array antenna. *IEEE Antenna and Propagation Society International Symposium*, Boston, USA, 2001, 4: 370-373.
- [6] Prakash V V S and Mittra R. Analysis of interaction between microwave antennas and frequency selective surface (FSS) radomes. *IEEE Antennas and Propagation Society International symposium*, Columbus, USA, 2003, 4: 404-407.
- [7] Parker E A, Philips B, and Langley R J. Analysis of coupling between a curved FSS and an enclosed planar dipole array. *IEEE Microwave and Guided wave Letters*, 1995, 5(10): 338-340.
- [8] Langley R J and Parker E A. Equivalent circuit model for arrays of square loops. *Electronic Letters*, 1982, 18(7): 294-296.
- [9] Hosseinipناه M and Wu Qun. Exposure reduction of S-band radar's staff by designing a frequency selective surface. *ICMMT Proceedings*, Nanjing, China, 2008: 456-457.
- 路 宝: 男, 1981 年生, 博士生, 从事天线 RCS 理论及 RCS 测量研究.
- 龚书喜: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁理论、电磁辐射、电磁散射与隐身技术等.
- 凌 劲: 男, 1983 年生, 博士生, 从事电磁散射计算及天线 RCS 理论研究.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>