

低 RCS 选频滤波反射面天线技术*

冯林 阮颖铮 雷平

(电子科技大学二系,成都 610054)

摘要 利用具有带阻选频特性的周期结构表面替代普通金属反射面构成的滤波反射面天线是一项克服天线散射的有效技术途径。本文给出了滤波反射面天线辐射特性和 RCS 的实测结果;分析讨论了此种天线的性能和可行性。

关键词 隐身技术;天线雷达散射截面;雷达截面减缩;频率选择表面;周期结构表面

一、引言

以按周期性排列的金属片振子或在金属板上周期性开凿孔隙而构成的周期结构表面,对于入射的电磁波有良好的选频反射或透射性能。这种频率选择表面(FSS)技术在国内外电磁隐身技术研究中已越来越受到重视和利用。采用带通型 FSS 制作雷达天线罩,在保证雷达工作波正常通过的同时,可使带外入射波向非威胁方向散射,从而有效地降低天线的后向雷达散射截面(RCS)^[1]。利用线极化带阻型 FSS 制作机载雷达天线的极化扭转反射板,可在实现对工作波的反射和扭转的同时,使带外入射波透过扭转而被其后的吸波材料吸收^[2]。另外,在普通吸波涂层中插入 FSS,利用 FSS 的谐振性和介质的谐振厚度可使涂层的吸收频带明显加宽^[3]。本文介绍的选频滤波反射面天线,则是用带阻型 FSS 制作卡塞格伦天线的主反射面,利用 FSS 反射面的选频反射作用,同时实现天线的正常工作和 RCS 减缩。

卡塞格伦天线和其它反射面天线的 RCS 是由天线本身的结构和增益决定的。它包括天线对来波直接散射构成的结构散射项和天线接收来波后又重新辐射形成的模式散射项^[4]。由于天线反射面的聚焦性和高增益性,决定了这类天线的 RCS 一般较大。显然,克服反射面对威胁雷达波的反射将有效地减小天线的 RCS。同时,为了保证反射面对雷达工作波的正常反射,可采用频率选择技术制作此类天线的反射面。

FSS 技术在天线工程中最早是被用来实现双频天线设计,这在微波通信和人造地球卫星通信中已广泛应用。本文所做工作是将此项技术应用于天线隐身的探索研究,着重

1992.04.06 收到,1992.08.17 定稿。

* 电子工业部电子科学研究院和南昌飞机制造公司资助项目。

冯林 男,1956年生,讲师,正从事电磁散射、天线等方面的教学和研究工作。

阮颖铮 男,1939年生,教授,博士生导师,从事电磁场和微波技术(天线与电磁散射)的教学和研究工作。

雷平 男,1955年生,讲师,正从事电磁散射、天线等方面的教学和研究工作。

研究选频滤波反射面天线的性能和可行性。

二、选频滤波反射面散射分析

从理论上精确分析有限大曲面 FSS 的散射特性是比较困难的,但可将其简化成无限大平面来进行分析,最后通过实测修正后再将理论分析结果用于实际反射面的设计。

滤波反射面是在介质基底表面上敷以带阻 FSS 而构成。当平面电磁波垂直入射时,介质基底可等效成终端接有负载 Z_0 ($Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为空气的本征阻抗)的传输线段,而 FSS 可等效成并联在这一传输线段上的 LC 电路^[4,5],如图 1 所示。图中 $Z = Z_0/\sqrt{\epsilon_r}$ 为介质的本征阻抗, ϵ_r 为介质基底材料的相对介电常数, d 为基底厚度, X 为 FSS 的等效阻抗。根据传输线理论可以求得图中 a-b 端口,即滤波反射面表面的反射系数 r :

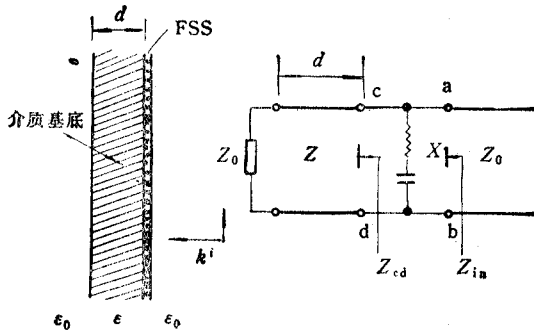


图 1 平面滤波反射面及其等效电路

$$r = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \quad (1)$$

式中

$$Z_{in} = \frac{Z_{cd} X}{Z_{cd} + X} \quad (2)$$

$$Z_{cd} = Z \frac{Z_0 + Z \operatorname{tg} kd}{Z + Z_0 \operatorname{tg} kd} \quad (3)$$

k 为介质中的波数。

FSS 的等效阻抗 X 由 FSS 单元振子的几何形状、尺寸及其排列形式决定,可用自谐振栅等效电路法^[4,5]或屋脊电流法^[6]求得。FSS 的频率选择特性,包括谐振反射频率、反射带宽等可以通过调整 FSS 的结构来控制。图 2 给出了十字振子结构的 FSS 频率特性的理论计算值。

由图可见这种结构的 FSS 具有明显的选频反射特性,最佳反射点频率在 15 GHz 附近,反射系数 R ($R = 20 \operatorname{tg} |r|$) 约 -0.01 dB ;而在典型的威胁雷达频段 $8 \sim 10 \text{ GHz}$ (X 波段) 范围内,反射系数在 -20 dB 以下。因此,如用这种 FSS 作为工作在 Ku 波段的天线的反射面,将在 X 波段获得很好的隐身效果,同时对雷达工作波能起到正常反射作用。

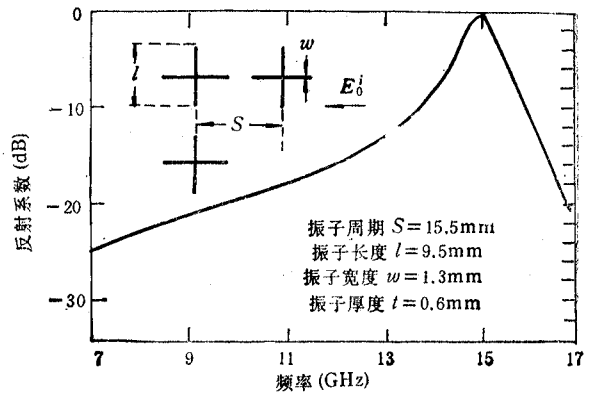


图 2 FSS 的反射系数

当 FSS 置于介质表面时,其等效阻抗应进行修正,简单地可取 FSS 分别置于空气和介质中时等效阻抗的平均值^[7]。

三、天线模型设计和测试

本文所研究的选频滤波反射面天线模型是根据典型雷达使用的二维单脉冲卡塞格伦天线进行设计的。假设天线工作在 Ku 波段、水平极化,威胁雷达波频率为 X 波段,并假设天线的旋转抛物面(主反射器)口径为

270mm, 焦距 84mm, 馈电多模喇叭口通过介质导引器接到口径为 70mm 的赋形副反射面, 喇叭后面接和差形成网络(和差器), 如图 3 所示。根据理论计算数据和优化结果, 滤波反射面的 FSS 十字振子按三角形排列, 振子斜角 $\theta = 45^\circ$, 排列周期 $S = 10\text{mm}$, 振子臂长 $l = 9\text{mm}$, 栅片宽 $w = 0.5\text{mm}$, 厚度 $t = 0.5\text{mm}$ 。

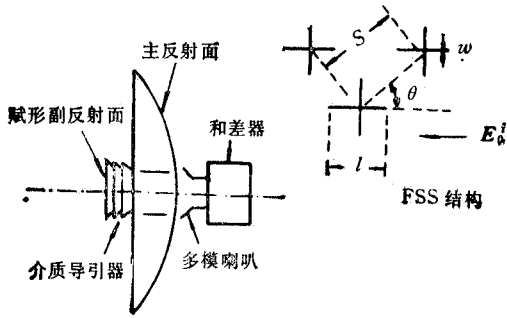


图 3 滤波反射面天线模型

反射面介质基底材料的相对介电常数 $\epsilon_r = 2.3$, 基底厚度 $d = 20\text{mm}$ 。对于频率为 9~10GHz 的人射波, 此厚度约等于一个介质波长。但是, 由于 FSS 对透射波的振幅和相位均有一定影响, 因而即使基底厚度满足无反射条件($d = n\lambda/2, n = 1, 2, 3, \dots, \lambda$ 为介质波长), 也不能实现无反射而只能达到一定程度的弱反射。

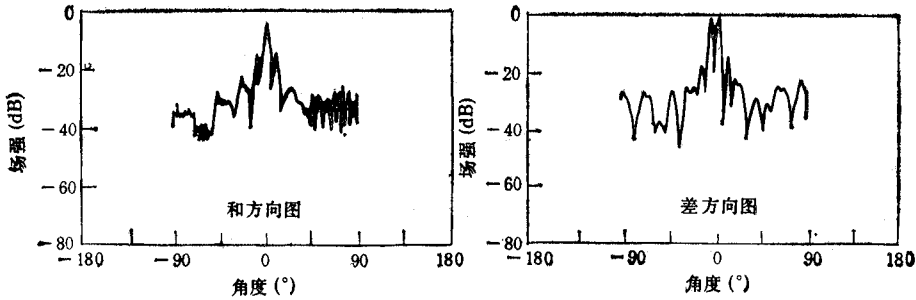


图 4 滤波反射面天线方向图

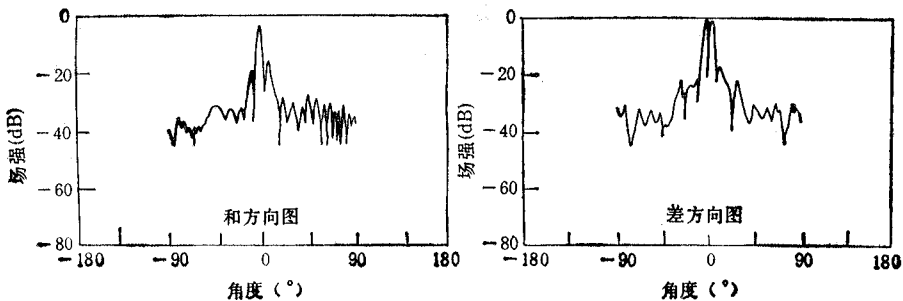


图 5 金属反射面天线方向图

天线模型的辐射特性和 RCS 分别在标准天线测试场和标准暗室 RCS 测试场进行。为了比较滤波反射面天线与普通金属反射面天线的辐射性能和滤波反射面的 RCS 减缩收益,同时对相同参数的金属反射面天线模型进行了测试。天线方向图测试方位角范围为 $\pm 90^\circ$, 取样间隔 0.1° , 极化方式为水平极化。图 4 和 5 分别给出了这两种天线模型在测试频率为 15.2 GHz 时的 E 面和差方向图。表 1 给出了这两种天线模型辐射方向图的主要参数。

表 1 天线模型方向图参数

模型名称	和 方 向 图			差 方 向 图	
	相对增益(dB)	3dB 主瓣宽度($^\circ$)	副瓣电平(dB)	零点深度(dB)	分离角($^\circ$)
滤波反射面	-0.4	5.31	-11.0	18.7	8.01
金属反射面	0	4.89	-12.5	18.0	7.0

由上面的测试结果可以看到,两个天线模型的辐射方向图吻合得相当好。与金属反射面天线模型相比,选频滤波反射面天线模型的和方向图增益仅下降 0.4dB, 3dB 主瓣宽度只增加了 0.42° , 第一副瓣电平提高了 1.5dB; 差方向图零点深度的变化为 0.7dB; 分离角增加了 1.01° 。为了考察滤波反射面天线模型辐射性能受工作频率的影响,又在 15GHz 频率上作了相同的测试。结果除增益损失增大为 3dB 外,滤波反射面天线方向图其它参数与金属反射面天线对应参数的差异基本保持在 15.2GHz 时的水平,即和波束 3dB 主瓣宽度增加 0.51° , 和方向图第一副瓣电平提高了 0.9dB, 差波束零点深度提高了 0.9dB, 分离角不变。当频率由 15.2GHz 减低到 15GHz 时,和增益的损失主要是由于滤波反射面 FSS 的反射性能下降引起的,例如 FSS 的阻带较窄或谐振反射点偏移都会导致这种情况。另外,两种天线辐射方向图存在的这些差异,排除测试误差因素外,模型加工、安装精度以及无限大平面理论计算结果用于有限大曲面设计等都是造成这些差异的原因。这些都可以通过改善模型加工工艺、提高加工精度和细致的测试修正来解决。

天线的 RCS 受诸多因素的影响,除反射面外,还受天线结构特点、模型安装支架和馈电系统的影响。同时,它又是一个有限大不规则目标的散射问题,所以对其 RCS 值很难准确预估。根据理论计算的结果,滤波反射面对 X 波段的来波反射系数在 -20dB 以下,因此可粗略估计用此滤波反射面构成的天线模型的 RCS 减缩效果将在 10dB 以上。

为了比较真实地模拟实际雷达天线馈源的匹配状况,对天线模型进行 RCS 测试时,在其和差器的和、差支路端口上均接有全匹配负载。图 6 和图 7 分别给出了在标准暗室 RCS 测试场测得的天线模型在水平极化和垂直极化情况下的 RCS。图中实线和虚线分别对应滤波反射面和金属反射面模型的测试

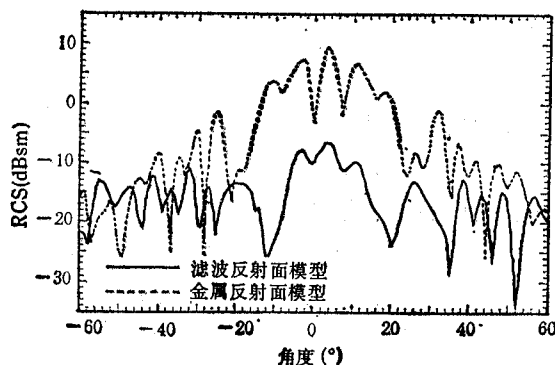


图 6 天线模型的 RCS (水平极化)

结果。目标测试姿态角为横滚 0° ，俯仰 0° ，测试方位角范围为 $\pm 60^\circ$ ，取样间隔为 1° ，测试双站角为 0° ，测试频率为 X 波段。

由图 6 可见，滤波反射面天线 RCS 的最大值（约 -7dBsm ）比金属反射面天线的最大值（约 9dBsm ）降低了 16dB ，在目标头部 $\pm 25^\circ$ 范围内的绝大部分角度上，两种天线的 RCS 的差值都超过了 15dB ，整个区域内滤波反射面天线的 RCS 减缩效果平均在 15dB

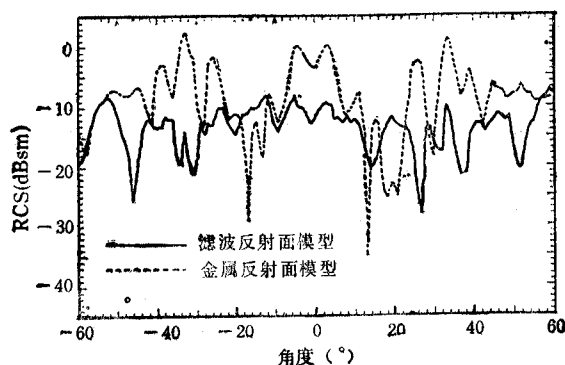


图 7 天线模型的 RCS (垂直极化)

以上。这是对此类天线的 RCS 性能的重大改善。由图 7 给出的垂直极化测试结果可见，滤波反射面天线在轴线 $\pm 25^\circ$ 范围内 RCS 的最大值（约 -9dBsm ）比此区域中金属反射面天线的最大值（约 0dBsm ）下降了 9dB 。垂直极化状态下滤波反射面天线的 RCS 减缩收益较水平极化的收益要小些，这是由于垂直极化时金属反面天线的 RCS 本身就比较小的缘故。比较图 6 和图 7 可见，金属反射面天线的

RCS 在水平极化时比垂直极化时高出 10dB 左右，而滤波反射面天线的 RCS 在两种极化方式下几乎有相同的电平（ -10dBsm 左右），这说明滤波反射面天线对两种极化的束波有同样良好的隐身性能。

利用天线的增益 G 和 RCS 定义的“RCS 系数” $K_r = \sigma/G^2$ （式中 σ 为天线的 RCS）^[8] 是定量描述天线系统隐身性能的参数。它是决定敌我双方雷达作用距离的比值。在维持天线增益不变的情况下降低天线的 RCS 或在保持同样 RCS 电平的同时提高天线的增益，都将使天线系统的 RCS 系数 K_r 减小，从而提高天线的隐身性能和雷达系统的对抗能力。滤波反射面天线在水平极化下可获得 15dB 的 RCS 减缩效果，同时增益损失 0.4dB 。据根上面的定义，其 RCS 系数可在金属反射面天线的基础上改善 14dB 左右，这意味着天线和雷达系统对抗能力的大大提高。

四、结 束 语

滤波反射面具有良好的选频反射性能，用其替代卡塞格伦天线的金属主射面之后，能够使天线在 Ku 波段维持正常工作的同时，在 X 波段获得 15dB 的隐身效果。实际上，根据滤波反射面的选频特性，此天线在工作带外的其它频段也将获得良好的隐身效果。另外，滤波反射面天线技术还可推广应用到其它类似的反射面天线。

选频滤波反射面天线技术，作为一项解决飞行器雷达反射面天线隐身问题的有效技术途径，还具有在工程上容易实现的优点。这项技术经过不断地提高和完善后，可望在实际中获得应用。

感谢航空航天部二院戴朝明高级工程师和周忠勤高级工程师在本文测试工作方面给予的大力协

助。

参 考 文 献

- [1] 阮颖铮, 宇航学报, 11(1990)4, 94—100.
- [2] 史为民, 赵明桂, 隐身技术, 6(1992)1, 25—31.
- [3] 冯林, 陆丛笑, 新型宽频带吸波涂层研究, 电子科学学刊, 14(1992)6, 618—623.
- [4] I. Anderson, *Bell Syst. Tech. J.*, 54 (1975) 10, 1725—1731.
- [5] R. J. Langley, A. J. Drinkwater, *IEE Proc.-H*, 129 (1982)1, 1—6.
- [6] Barry J. Rubin, Henry L. Bertoni, *IEEE Trans. on AP*, AP-31 (1982) 6, 829—836.
- [7] E. F. Knott 等著, 阮颖铮等译, 电子工业出版社, 北京, 1988 年, 第九章.
- [8] 阮颖铮, 隐身技术, 6(1992)1, 8—14.

A STEALTHY ANTENNA WITH FREQUENCY SELECTIVE REFLECTOR

Feng Lin Ruan Yinzheng Lei Ping

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract A Cassegrain antenna with frequency selective reflector is introduced, and the measured radiation properties and radar cross-section (RCS) of the antenna are give and discussed. In comparison with ordinary metallic reflector, this antenna can obtain similar radiation pattern and about 15dB of RCS reduction.

Key words Stealth technology; Antenna radar cross-section; Radar cross-section reduction; Frequency selective surface; Periodic structure surface