

天线模式项散射分析与天线 RCS 减缩¹

冯 林 邓书辉 阮颖铤 胡玉兰

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

摘 要 天线的散射场是由结构散射场和模式散射场两项组成。理论分析和实验结果表明,后者对天线的雷达散射截面 (RCS) 的贡献比前者要大得多,有效地克服模式散射场将会明显地降低天线的 RCS。本文提出了一种以克服面天线模式散射场达到降低天线雷达截面的模式项消去法减缩天线 RCS 技术,并在几种天线模型上进行了实验。实验结果证明,这种技术减缩天线 RCS 的效果,不管在天线工作频带内还是频带外均可达到 10 ~ 15dB。模式项消去法减缩技术是一种降低面天线 RCS 的新途径,比其它减缩技术频带更宽,具有较好的工程适用性。

关键词 天线, 天线散射, 雷达散射截面, 隐身技术

中图分类号 TN820

1 引 言

天线的电磁散射比普通散射体的散射要复杂得多。除了入射波在天线表面上引起的感应电流将直接产生电磁散射形成结构散射项外,天线接收电磁波后还会因其馈源系统的反射形成再辐射场,从而构成天线的模式散射场^[1]。因此,天线不单单是一个被动散射体。滤波反射面低雷达散射截面 (RCS) 天线技术^[2,3]是利用周期结构表面的选频滤波或极化滤波特性,在天线工作频带以外或正交极化情况下实现天线 RCS 减缩。其工作原理是在带外或正交极化时消除天线主反射面的反射,从而达到降低天线 RCS 的目的,其效果可以达到 10 ~ 15dB。但此项技术只适用于天线的带外或正交极化隐身,而且设计制作滤波天线的主反射面在工程上有一定的难度。面天线阻抗加载抵消技术^[4-6]则是通过阻抗加载控制天线结构散射场与模式散射场之间的相位差,使二者反相对消。这项技术的主要缺点是它的频率敏感性,隐身频带窄, RCS 减缩效果不十分理想(大约只有 3 ~ 5dB)。造成其减缩效果欠佳的主要原因是天线的结构散射场和模式散射场强度相差太大(约 10dB),使得二者不可能有效地对消。

事实上,天线模式散射项对天线 RCS 的贡献远比结构散射项的贡献要大^[7],这在以往的研究中^[4-6]并没有给予足够的估计,滤波反射面低 RCS 天线技术^[2,3]的基本工作原理和重点也不是针对天线模式散射项的。本文在对天线散射机理进行理论分析和实验研究的基础上,提出了一种通过消去天线模式散射项而降低天线 RCS 的技术。此技术不仅能在天线工作频带外大大降低天线的 RCS,在工作频带内减缩 RCS 的效果也非常显著。

¹ 1994-07-12 收到, 1994-11-14 定稿

2 天线 RCS 的理论分析

天线的 RCS σ 是由对应于天线结构散射项的结构项 RCS σ_s 与对应于模式散射项的模式项 RCS σ_e 的相位叠加,

$$\sigma = |\sqrt{\sigma_s} + \sqrt{\sigma_e} e^{j\psi}|^2, \quad (1)$$

式中 ψ 为结构散射场与模式散射场之间的相位差, 是一个受天线结构、馈源和频率影响的参数, 一般很难准确地定量分析。

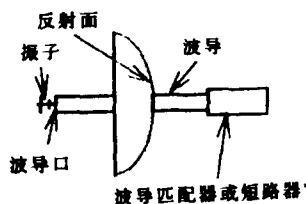


图1 波导激励振子馈电的抛物面天线

天线的结构项 RCS σ_s 可以用分析普通散射体的电磁散射理论和数值方法直接求解^[8,9]。模式项 RCS σ_e 则与天线增益 G 、极化匹配因子 μ 、馈源反射系数 Γ 和电磁波波长 λ 有关,

$$\sigma_e = \lambda^2 G^2 \mu^2 \Gamma^2 / (4\pi). \quad (2)$$

在天线工作频带内, 如果馈源系统为理想匹配, 入射的电磁波能量应全部或绝大部分地进入接收系统, 没有二次辐射。这时天线实际上是一个理想的接收装置。当来波频率偏离天线工作频率时, 天线馈源系统将失配, 即使是在天线工作频带内, 馈源系统通常也不会是理想匹配。这时入射波就会被反射并经天线重新辐射出去, 形成较强的模式散射场。在天线工作频带以外, 天线馈源系统将完全失配, 模式散射场会更强。

图1所示为一个以波导激励振子馈电的抛物面天线。抛物面的焦距 $f=200\text{mm}$, 口径半径 $a=200\text{mm}$, 天线工作在 X 波段, 垂直极化方式。天线轴线方向的结构项 RCS 可以由下式求得^[8]

$$\sigma_s = 10 \lg \left\{ 4\pi f^2 \left[4\sqrt{1 + (d/f) \sin^2 kd} + (\sqrt{1 + (d/f)} - 1)^2 \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 $d = a^2/(4f)$, $k = 2\pi/\lambda$ 。此式没有考虑天线馈源的结构散射, 因为一般天线馈源的结构散射比主反射面的结构散射弱得多, 可以忽略不计^[8,9]。此天线的增益与天线口径面积 S 和口径利用系数 γ 有关, 即 $G = 4\pi S\gamma/\lambda^2$ 。在天线中心频率 $f_0=8.9\text{GHz}$ 处, $G \approx 30\text{dB}$, $\gamma \approx 0.6$, 随着频率偏离中心频率, 振子方向图会发生畸变, 将引起 γ 减小, 其变化规律假定为

$$\gamma = 0.6 - [(f - f_0)/(f + f_0)]^2. \quad (4)$$

经测试, 馈源反射系数 Γ 在 f_0 处为 0.08, 在 X 波段的两端 8 和 12GHz 处分别为 0.5 和 0.7 左右。对于垂直极化的入射波, 极化匹配因子 $\mu=1$ 。

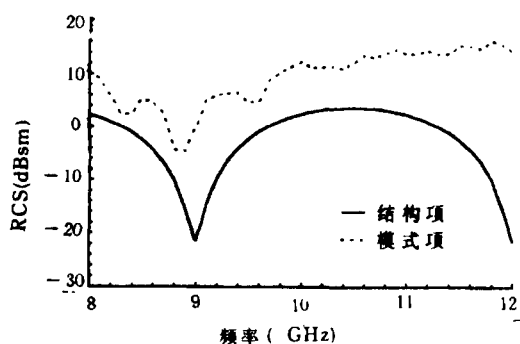


图 2 天线的结构项 RCS 和模式项 RCS 计算值 (轴线方向)

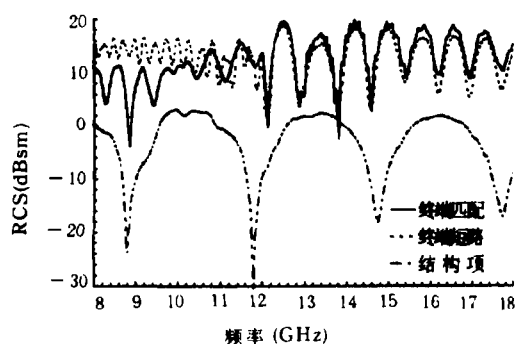


图 3 波导激励振子抛物面天线 RCS 实测值 (轴线方向)

图 2 给出了 X 波段内 σ_s 和 σ_e 的计算值。结果表明, σ_s 随频率呈周期性起伏, 最大值约 3dBsm, 最小值小于 -20dBsm, σ_e 以中心频率 $f_0=8.9\text{GHz}$ 处为最低点 (约 -4dBsm) 向两边逐渐增大至 10dBsm 以上。在整个 X 波段内 σ_e 均大于 σ_s , 一些频率点上差值超过 10dB, 可见天线模式项雷达截面 σ_e 在天线总的 RCS 中所起的作用很大。

3 馈源系统对天线 RCS 的影响

天线的馈源系统包括馈源本身和负载。馈源系统的匹配状况 (如振子与波导激励口之间、馈源与负载之间以及负载本身的匹配状况) 决定了馈源系统的反射率 Γ , 从而影响到天线的模式项 RCS σ_e 和总的 RCS σ 。

图 3 给出了图 1 所示天线终端分别接 X 波段波导匹配器和短路器时实测到的天线 RCS 和结构项 RCS。终端全匹配是为了模拟实际雷达天线系统在其工作频率附近的匹配状态, 终端短路则是为了考察馈源系统失配时天线的 RCS。实验结果表明, 终端短路时 (馈源失配), 天线 RCS σ 在 8 ~ 18GHz 频率范围内均在 10dBsm 以上, 高出结构项 RCS σ_s 10dB 以上, 一些地方超过 30dB。全匹配器虽然频带较宽, 在整个 X 波段内反射系数均小于 0.1, 但馈源本身的反射却受频率影响较大。当频率偏离中心频率 $f_0 \approx 8.9\text{GHz}$ 后反射增大, 馈源系统失配, 模式项 RCS σ_e 增大 (图 2), 从而导致天线 RCS 仅在 f_0 附近较小 (约 0dBsm), 偏离 f_0 后很快增加至 10dBsm 以上。到了 Ku 波段 (12 ~ 18GHz), 虽然馈源终端仍然接全匹配器, 但馈源本身的反射已经使入射波在到达馈源终端之前就被反射出来, 因而终端的匹配器失效, 天线 RCS 基本与终端短路时的曲线重合。从理论上讲, 天线馈源系统在中心频率全匹配, 应有 $\Gamma=0$, $\sigma_e=0$, 天线 RCS 应只剩结构项 RCS σ_s 。事实上即使是在 f_0 处, 实测到的天线 RCS 仍比 σ_s 高出 10dB 以上, 说明即使天线馈源终端实现了全匹配, 馈源本身的反射仍然有很大影响。当然这里还包含了天线馈源结构散射带来的影响。由此可见, 天线馈源系统的匹配状况对天线 RCS 有很大的影响。

4 抑制模式散射项降低天线 RCS

克服或降低天线模式散射所产生的 σ_e ，将有效地降低整个天线的 RCS。加宽天线馈源系统的频带宽度，使其在较宽频率范围内较好地匹配，可以在带内有效地克服模式散射场。为了在带外克服模式散射，可以采用散焦的方法。另外还可以在雷达天线不工作阶段，采用偏焦的方法来抑制模式散射项和天线 RCS。对于一个双反射面天线，如果将其副反射面更换成带阻型频率选择表面，则在天线工作频带以外副反射面将不再能把主反射面聚集的来波反射到馈源中，天线的模式散射项被克服。这种带外散焦技术与选频滤波主反射面天线技术^[2]一样，可以在带外获得显著的 RCS 减缩效果，但是其工程应用比后者容易得多。图 4 给出了 X 波段、水平极化情况下，一个典型卡塞格伦双反射面天线使用原副反射面和换用选频滤波副反射面的 RCS 实测值。此天线工作在 Ku 波段，水平极化。由图可见，使用选频副反射面后，在天线轴线 (0°) 附近可以获得 20dB 左右的 RCS 减缩效果，在 $\pm 20^\circ$ 范围内减缩 RCS 的效果也很显著。

图 5 所示为一个波导裂缝前馈电的抛物面天线在其模式散射项克服前后实测的 RCS 值。水平极化时，除了在天线工作频率 9GHz 附近，RCS 的减缩效果一般可达到 10dB 以上。9GHz 附近原天线 RCS 较小的原因显然是此时天线的馈源系统匹配良好，模式散射项很小，天线 RCS 只剩下结构项。当频率偏离此频率点后，系统逐渐失配，克服模式项前后 RCS 的差值逐渐扩大到 10dB 以上。对于垂直极化状态，克服模式散射项后的 RCS 基本与水平极化时的值相同。由于此时处于非天线工作极化方式，工作频率附近克服模式散射项前的 RCS 显然比水平极化时要高。

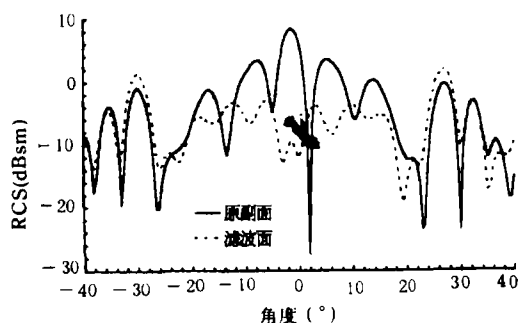


图 4 卡塞格伦天线 RCS 实测值

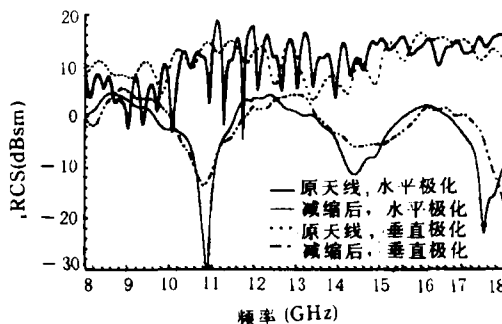


图 5 波导裂缝馈源抛物面天线 RCS 实测值 (轴线方向)

5 结束语

理论分析和实验结果证明模式散射项对天线 RCS 的影响很大，而克服或减小这种散射会显著地降低天线的 RCS。这种着眼于抑制模式散射项的天线 RCS 减缩技术，为探索和研究降低雷达天线 RCS 的途径提出了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] Harrington R F. IEE Trans. on AP, 1963, AP-11(6): 595-596.
- [2] 冯林, 阮颖铮, 雷平. 电子科学学刊, 1993, 15(5): 506-511.
- [3] 冯林, 雷平, 阮颖铮. 航空学报, 1993, 14(11): 649-652.
- [4] 阮颖铮, 韩晓英, 冯林, 雷平. 隐身技术, 1990, 6(1): 13-17.
- [5] 阮颖铮. 宇航学报, 1990, 11(4): 94-100.
- [6] 阮颖铮. 隐身技术, 1992, 14(1): 8-14.
- [7] Reuster D D, Thiele G A, Eloee P W. Development of low RCS reflector antenna system. Proc. IEEE /AP-S, Seattle, USA: 1994, 2325-2328.
- [8] 邓书辉, 阮颖铮. 宇航学报, 1991, 12(1): 84-88.
- [9] 邓书辉, 阮颖铮. 电子科技大学学报, 1990, 19(5): 519-526.

ANTENNA-MODE SCATTERING COMPONENT AND
RCS REDUCTION

Feng Lin Deng Shuhui Ruan Yingzheng Hu Yulan

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

Abstract The radar cross-section (RCS) of antennas can be divided in to two parts, one is the common structural scattering component, another is the antenna-mode scattering component produced by antenna's re-radiation. Three kinds of antenna's RCS are discussed and the measured antenna's RCS reduction by the method of minimizing the mode scattering component are given. The experimental results show that the RCS reduction is about 10-15 dB both in the operating band and outside the band. The technique expressed in the paper is hoped to be used to the antenna's RCS reduction research and applications.

Key words Antenna, Antenna scattering, Radar cross-section reduction, Stealthy technique

冯 林: 男, 1956 年生, 副教授, 从事电磁散射、天线等方面的教学和研究工作.

邓书辉: 男, 1963 年生, 副教授, 从事电磁散射、天线等方面的研究和教学工作.

阮颖铮: 男, 1939 年生, 教授, 从事天线、雷达和电磁散射方面的研究和教学工作.