

扭极化变形卡塞格伦天线的雷达 截面分析*

阮 颖 铮

(电子科技大学, 成都 610054)

摘要 扭极化变形卡氏天线由于其结构上和电气上的一系列优点, 已被广泛地应用于飞行器雷达系统, 但对这种天线的散射特性和雷达截面 (RCS), 至今尚未进行系统的理论和实验研究. 本文从天线散射机理出发, 分析了这种天线对带内外各种极化波的 RCS, 给出了轴向入射时天线 RCS 的计算结果.

关键词 卡塞格伦天线; 雷达截面; 电磁散射

1. 引言

放大系数为 1 的变形卡氏天线^[1], 若其副面为栅状抛物面, 主面用 90° 极化扭转板, 则经主面反射的扭极化波可以完全穿透副面, 从而最大限度地消除了副面及其支杆的遮挡效应. 由于副面尺寸很大, 可进一步减小能量漏失, 并可兼作天线罩把主面和馈源封闭起来. 当天线波束扫描时, 可以只转动扭极化板而保持馈源和副面不动, 且平板转角仅为扫描角的一半. 由于上述结构上和电气上的优点, 这种天线已被广泛地应用于多种机载和

弹载雷达, 特别是当天线口径尺寸较小的情况.

随着飞行器技术的迅速发展, 对天线系统隐身性能的要求更加迫切, 因而变形卡氏天线的 RCS 大小就成了它能否应用的关键. 本文从天线散射机理出发^[2,3], 分析了这种天线对不同频率和不同极化的威胁雷达波呈现的 RCS 贡献, 给出了轴向入射时 RCS 的理论公式和计算结果.

2. 天线结构和散射机理分析

扭极化变形卡氏天线的结构如图 1 所示. 馈源辐射的水平极化球面波被间距 $d_1 = \lambda_0/8 \sim \lambda_0/10$ 的水平栅条抛物面反射后投射

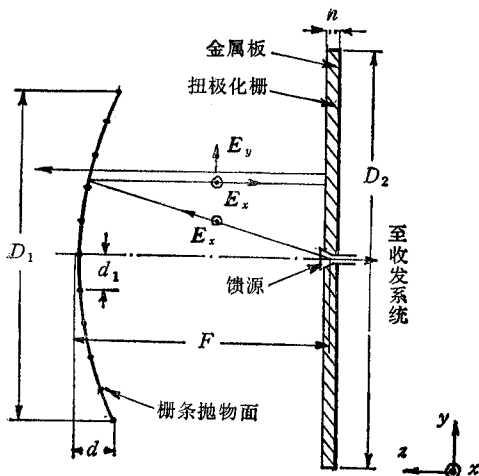


图 1 扭极化变形卡氏天线结构示意图

1991.09.02 收到, 1992.01.23 定稿.

* 国家自然科学基金和国家教委博士点基金资助项目.

阮颖铮 男, 1939 年出生, 教授, 博士生导师, 从事电磁场与微波技术(天线与电磁散射)的教学和研究工作.

到扭转板上。扭转板由 45° 平行栅条和一块金属板构成, 栅条间距 $d_2 = \lambda_0/6 \sim \lambda_0/10$, 高 $h = \lambda_0/4$ 。因此由副面反射的水平极化波可分解成 $\pm 45^\circ$ 两个相等的分量, 并分别在扭转板表面和底板处反射。由于二者有 $\lambda_0/2$ 的相对行程差, 使合成的反射波变为垂直极化, 并顺利地通过水平栅条副面而向空间辐射。这就是该天线的简要工作原理。

为了分析这种天线的散射机理并计算其 RCS 贡献, 假定天线中心频率为 $f_0 = 10$ GHz, 抛物面和扭转板口径尺寸分别为 $D_1 = 40\text{cm}$, $D_2 = 46\text{cm}$, 抛物面焦距 $F = 30\text{cm}$, 深度 $d = 3.3\text{cm}$, 口径利用系数 $\nu = 0.4$ 。由于馈源匹配程度通常随频偏增加而变坏, 故可假定其反射系数随频率 f 的变化关系为

$$\Gamma = (p^2 - 1)/(p^2 + 1), \quad p = f/f_0 \quad (1)$$

(1) 带内垂直极化波入射 与图 1 所示射线路径相反, 垂直极化平面波首先透过抛物面而在扭转板上反射成水平极化, 再次照射到水平栅条抛物面的凹面, 于是以后的散射过程就与普通抛物面天线完全一样。一方面抛物面上的水平感应电流产生水平极化的结构项散射场, 经极化扭转后透过抛物面形成垂直极化结构项 $\text{RCS}(\sigma_{VV,i})$, 而模式项则可忽略不计 ($\sigma_{VV,e} \approx 0$)。另一方面, 由于 $D_1 < D_2$, 一部分入射波经扭转板直接反射而产生水平极化散射场, 构成交叉极化 $\text{RCS}(\sigma_{VH})$ 。

(2) 带外垂直极化波入射 此时电波路径与带内情况相同, 但散射过程却有两点显著区别。第一, 扭极化栅片高度在带外不再为 $\lambda/4$, 因而极化扭转纯度降低, 对垂直极化入射波将产生附加的垂直极化(未扭转)反射波, 并直接透过抛物面水平栅条而产生附加的结构项 $\text{RCS}(\sigma_{VV,i1})$, 它与原来经过扭转的结构项 $\text{RCS}(\sigma_{VV,i2})$ 一起构成总的结构项 $\text{RCS}(\sigma_{VV,i})$ 。第二, 由于带外馈源不匹配, 应计入模式项 $\text{RCS}(\sigma_{VV,e})$ 。由此可见, 这种天线的带外垂直极化 RCS 将比带内大许多。

(3) 水平极化波入射 由于抛物面栅条间距 d_1 很小, 只要 $\lambda > 2d_1$, 则无论带内外的水平极化波都只能在抛物面凸面上反射而不能透过抛物面, 因此水平极化 $\text{RCS}(\sigma_{HH})$ 只有结构项 ($\sigma_{HH,i}$) 而没有模式项 ($\sigma_{HH,e} = 0$)。此外, 扭转板的直接反射也将产生交叉极化 $\text{RCS}(\sigma_{HV})$ 。

3. 天线的 RCS 计算

精确地计算各种频率、各种极化、各种入射角和各种扫描角下天线的 RCS 贡献, 这是一个十分复杂的电磁理论问题。为简化起见, 我们假定天线波束未扫描, 并只考虑轴向入射的情况, 因为卡氏天线通常在轴向有最大的 RCS。

(1) 带内垂直极化 σ_{VV} 此时变形卡氏天线与一般抛物面天线有相同的散射机理。文献[3—7]给出了抛物面天线的镜面反射场和边缘绕射场的表达式。轴向入射时, 这两部分散射场产生的结构项 RCS 可简化为^[7]

$$\sigma_{VV} = 4\pi F^2 [4\sqrt{1 + d/F} \sin^2(k_0 F) + (\sqrt{1 + d/F} - 1)^2] \quad (2)$$

式中 F 为抛物面焦距, d 为抛物面深度(图 1)。

(2) 带外垂直极化 σ_{VV} 带外 σ_{VV} 包括三部分, 即扭转板结构项 $\sigma_{VV,i1}$, 抛物面结构项 $\sigma_{VV,i2}$, 馈源失配模式项 $\sigma_{VV,e}$, 它们都与频偏和扭极化纯度有关。由于带外极化栅片电长度为

$$kh = pk_0\lambda_0/4 = p\pi/2 \quad (3)$$

经扭转反射后,两个 $\pm 45^\circ$ 极化分量间出现相位差 $p\pi$. 假定入射波电场为 $E_0 = \hat{y}E_0$, $\pm 45^\circ$ 方向的单位矢量分别记为 $\hat{u}$ 和 $\hat{v}$, 则扭极化反射场为

$$\begin{aligned} E_r &= \hat{u}(E_0/\sqrt{2}) + \hat{v}(E_0/\sqrt{2})\exp(-jp\pi) \\ &= \hat{x}(E_0/2)[1 - \exp(-jp\pi)] + \hat{y}(E_0/2)[1 + \exp(-jp\pi)] \\ &= \hat{x}E_0 \sin(p\pi/2)\exp[-j(p-1)\pi/2] + \hat{y}E_0 \cos(p\pi/2)\exp(-jp\pi/2) \end{aligned} \quad (4)$$

于是扭极化板和抛物面的结构项 RCS 可表示为^[7,8]

$$\sigma_{VV,s1} = 4\pi(\pi D_2^2/4\lambda)^2 \cos^2(p\pi/2) \quad (5)$$

$$\sigma_{VV,s2} = 4\pi F^2[4\sqrt{1+d/F} \sin^2(pk_0d) + (\sqrt{1+d/F} - 1)^2] \sin^2(p\pi/2) \quad (6)$$

馈源失配模式项 RCS 可简单表示为^[3]

$$\sigma_{VV,e} = \lambda^2 G^2 \Gamma^2 / 4\pi = \pi^3 p^2 \Gamma^2 v^2 D_1^4 / 4\lambda_0^2 \quad (7)$$

利用上三式相位求和,可得到带外垂直极化时总的 RCS^[3]

$$\sigma_{VV} = |\sqrt{\sigma_{VV,s1}} \exp(j\phi_{s1}) + \sqrt{\sigma_{VV,s2}} \exp(j\phi_{s2}) + \sqrt{\sigma_{VV,e}}|^2 \quad (8)$$

式中 ϕ_{s1} 和 ϕ_{s2} 分别表示扭转板和抛物面结构项相对于模式项的相位差,由射线路径几何关系知

$$\phi_{s1} = 4pk_0F - p\pi/2 \quad (9)$$

$$\phi_{s2} = 2pk_0F - (p-1)\pi/2 \quad (10)$$

因此,(8)式预示了一个强烈振荡的 RCS 频率特性. 工程上常用非相关和来预估雷达截面,即

$$\sigma_{VV} = \sigma_{VV,s1} + \sigma_{VV,s2} + \sigma_{VV,e} \quad (11)$$

天线各部分对垂直极化波的 RCS 随频率 $p = f/f_0$ 而变化的计算结果如图 2 所示,图中点线表示非相关和的结果. 由图可见,在工作频带以外, σ_{VV} 将迅速增加,可比带内增大 10—20dB.

(3) 带内外水平极化 σ_{HH} σ_{HH} 主要来自抛物面表面反射,若忽略边缘绕射,则可由几何光学求得^[8]

$$\sigma_{HH} \approx 4\pi F^2 = 1.13(\text{m}^2) \quad (\text{即 } 0.53\text{dBsm}) \quad (12)$$

(4) 带内外交叉极化 σ_{VH} 和 σ_{HV} 交叉极化 RCS 来自入射波对扭转板的直接照射,根据物理光学结果, σ_{VH} 和 σ_{HV} 可由被照射面积给出^[8]

$$\sigma_{VH} = \sigma_{HV} = \pi^3 p^2 [(D_2^2 - D_1^2)/\lambda_0]^2 / 4 = 22.93 p^2 (\text{m}^2) \quad (13)$$

上式表明,交叉极化 RCS 随频率升高而单调增加.

4. 结论

本文利用天线散射理论分析了扭极化变形卡氏天线在各种频率和各种极化下的散射机理、RCS 理论公式和计算结果,表明这种天线虽有良好的辐射特性和结构特性,但与

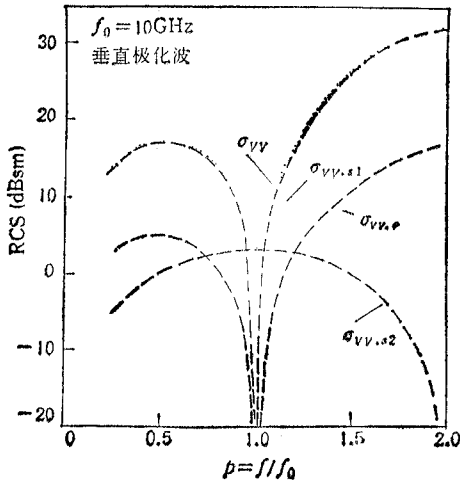


图 2 垂直极化波 RCS 随频率的变化曲线
何光学求得^[8]

同尺寸标准卡氏天线 ($\sigma \approx 2\text{dBsm}$) 比较, 其 RCS 要大很多。为适合隐身飞行器应用, 可采取多种途径来减小其 RCS^[3]。例如当天线不工作时将扭转板偏转一个较大角度, 可实现天线伪装隐身。利用频率选择表面作成滤波天线罩或扭极化板, 也可解决带外隐身。但所有这些措施都不应降低天线原有性能, 这正是问题困难之所在。

参 考 文 献

- [1] 谢处方, 邱文杰, 天线原理与设计, 西北电讯工程学院出版社, 西安, 1985 年, 第 320—323 页。
- [2] 阮颖铮, 电子学报, **18**(1990)6, 92—96。
- [3] 阮颖铮, 宇航学报, **11**(1990)4, 94—100。
- [4] 邓书辉, 阮颖铮, 电子科技大学学报, **19**(1990)5, 519—526。
- [5] 邓书辉, 阮颖铮, 电子科学学刊, **12**(1990)4, 361—368。
- [6] 邓书辉, 阮颖铮, 航空学报, **12**(1991)5, 294—302。
- [7] 邓书辉, 阮颖铮, 宇航学报, **12**(1991)1, 84—88。
- [8] E.F.Knott 等著, 阮颖铮等译, 雷达散射截面, 电子工业出版社, 北京, 1988 年, 第 112—155 页。

RCS ANALYSIS OF MODIFIED CASSEGRAINIAN ANTENNA WITH POLARIZATION ROTATOR

Ruan Yingzheng

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

Abstract Modified Cassegrainian antenna with polarization rotator has been widely used in the airborne radar systems because of its electrical and structural advantages. Up to now, however, the scattering aspect of this antenna has not been systematically investigated theoretically and experimentally. In this paper, the radar cross-section (RCS) of this antenna under the incidence of EM waves of various frequencies and polarizations is evaluated based on antenna scattering theory. The numerical results show that this kind of antenna contributes a substantial RCS in the nose-on region, and it will be quite a difficult task to reduce its RCS contribution without degradation of antenna performances.

Key words Cassegrainian antenna; Radar cross-section (RCS); Electromagnetic scattering