

箔片平均 RCS 的频率特性研究

李金梁, 李永祯, 王雪松

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 首先基于物理光学法对单个箔片的电磁散射特性进行了计算与分析, 然后结合箔片姿态分布的统计规律, 推导了圆形箔片平均雷达截面积(RCS)的精确公式, 并利用数值积分的方法给出了方形箔片的平均 RCS。在此基础上, 分析了箔片平均 RCS 随频率的变化关系, 结果表明, 箔片的平均 RCS 近似反比于波长的一次方, 且等面积的圆形箔片和方形箔片的平均 RCS 相差很小。最后, 导出了箔片平均 RCS 的近似计算公式, 推导了箔片云团 RCS 的统计特性, 得到了箔片云团的 RCS 服从指数分布的结论。

关键词: 箔片; 平均 RCS; 物理光学法; 频率

中图分类号: TN972⁺.4 **文献标识码:** A

Frequency characteristics of foil average RCS

Li Jinliang, Li Yongzhen, Wang Xuesong

(College of Electronic Science and Engineering, National
University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: Characteristics of electromagnetic scattering by a single foil is studied and analyzed through physical optimal(PO) method. Based on the statistic distribution of foils' gesture, the formula of the round foil average RCS is derived and the square foil average RCS is gained by numerical integration. Based on the result, the relationship between foil average RCS and frequency is analyzed. It is validated that the average RCS of foil is approximately in inverse proportion to wave length and the average RCS difference between round foils and square foils can be neglected. Then an approximate formula of foil average RCS is presented. At last, the statistic characteristic of foil cloud is derived, and it is conclude that the RCS of foil cloud follows exponential distribution law.

Key words: foil; average RCS; PO method; frequency

1 引言

箔条是最为常用的无源干扰手段, 箔条的长度一般选为雷达工作波长的一半, 其相对带宽约为 10%~15%, 同样质量的箔条, 被干扰雷达波长越长, 箔条所能达到的总的 RCS 越大。当雷达工作频率很高时, 箔条的干扰效果将受到一定程度的制约, 此时一般选用箔片来弥补箔条在高频段的不足。据报道, 在海湾战争中美军大量使用了箔片干扰, 这也是箔片首次用于作战。箔片的尺寸相对于被干扰雷达的工作波长一般较大, 干扰是主要利用箔片对雷达电磁波的平面散射。箔片可以干扰很宽的频段, 衡量箔片云团的干扰效果

应该在较宽的频率范围内综合考虑箔片云团的 RCS。迄今为止, 对箔片干扰的研究已有较多研究成果, 主要集中在箔片 RCS 的分析计算上, 但对箔片平均 RCS 的频率特性的研究尚很欠缺, 仅讨论了箔片的最大 RCS, 没有给出箔片平均 RCS 的计算公式和箔片云团 RCS 的统计特性^[1-2]。因此, 本文利用物理光学法对单个箔片的电磁散射特性进行了计算, 然后结合箔片的姿态分布, 给出了箔片平均 RCS 随频率变化关系的结果。在此基础上, 导出了箔片平均 RCS 的近似计算公式, 推导了箔片云团 RCS 的统计特性, 得出箔片云团的 RCS 服从指数分布的结论。

2 单个箔片的雷达散射特性

物理光学法通过对感应场的近似积分而求得散射场, 是高频电磁计算的常用方法之一。当箔片的尺寸

收稿日期: 2009-03-31; 2009-05-31 修回。

作者简介: 李金梁 (1982-), 男, 博士研究生, 主要从事无源干扰、极化信息处理方面的研究。

相对于雷达的波长较大时,箔条的散射以平面散射为主。假设箔片的材料为良导体,形状规则,不考虑加工误差对其雷达散射特性的影响。忽略边缘散射,根据物理光学法可知,如果入射波在单位矢量 \hat{i} 给定的方向上传播,磁场强度为 H_0 ,且磁场沿单位矢量 \hat{h}_i 方向极化,则箔片的散射电场的表示式为^[2]:

$$\mathbf{E}_s = -j2kZ_0H_0\psi_0 \int_{S_1} \hat{s} \times [\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)] \exp[jkr(\hat{i} \cdot \hat{s})] dS \quad (1)$$

式中 S_1 为物体的照明部分, $\hat{h}_i = H_0\hat{h}_s$, \hat{s} 为指向散射方向的单位矢量, r 是到表面单元 dS 的位置矢量, \hat{n} 为表面单元 dS 的法向方向的单位矢量, R 为源点到场点的距离, $\psi_0 = \exp(jkR)/(4\pi R)$ 为远场 Green 函数, Z_0 为自由空间的特性阻抗, $Z_0 = 120\pi\Omega$, $k = 2\pi/\lambda$ 。对于后向散射的情况, $\hat{i} = -\hat{s}$ 。对于箔片,由于 S_1 为一平面,所以式(1)中随表面变化的唯一项是相位项,所有其它项都是常数。

建立坐标系如图 1 所示,电场散射方向为 (θ, ϕ) ,电场的水平极化基和垂直极化基分别选为 \hat{e}_ϕ 和 \hat{e}_θ 。

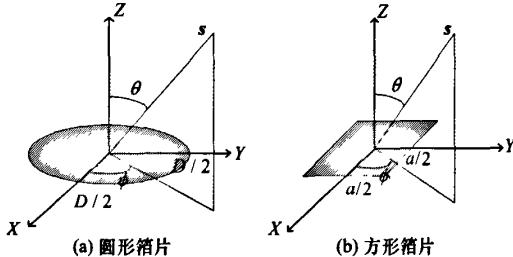


图 1 箔片的雷达散射示意图

由式(1)可得,不同种类箔片的极化特性是相同的,不具备变极化效应,其归一化的极化散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 。散射场的强度为入射场方向 (θ, ϕ) 的函数,箔片的最大散射方向为法线方向,最大散射强度为:

$$E_{s,\max} = E_s(0, \phi) = 2kZ_0H_0\psi_0A \quad (2)$$

式中, A 为箔片的面积。根据 $\sigma = 4\pi R^2 \parallel \mathbf{E}_s \parallel^2 / \parallel \mathbf{E}_i \parallel^2$, 可得对应的最大 RCS 为 $\sigma_{\max} = 4\pi A^2 / \lambda^2$ 。

由式(1)可得,对圆形箔片,其电磁散射的方向性函数为:

$$\begin{aligned} F(\theta, \phi) &= \frac{\cos\theta}{\pi D^2/4} \int_0^{D/2} \rho d\rho \int_0^{2\pi} \exp[-jk2\rho\sin\theta\cos(\phi - \varphi)] d\varphi \\ &= \frac{\cos\theta}{\pi D^2/4} \int_0^{D/2} 2\pi J_0(2k\rho\sin\theta)\rho d\rho \\ &= \cos\theta \frac{2J_1(kD\sin\theta)}{kD\sin\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, D 为圆形箔片的直径。

对于方形箔片,其电磁散射的方向性函数为:

$$\begin{aligned} F(\theta, \phi) &= \cos\theta/a^2 \int_{-a/2}^a \int_{-a/2}^{a/2} \exp[-jk(x\hat{x} + y\hat{y}) \cdot \hat{s}] dx dy \\ &= \cos\theta \operatorname{sinc}(ka\cos\phi\sin\theta) \operatorname{sinc}(ka\sin\phi\sin\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, a 是方形箔片的边长。 $J_1(\cdot)$ 为 1 阶的贝塞尔函数。图 2 给出了圆形和方形箔片的散射方向图,其中, $x = \theta\cos\phi$, $y = \theta\sin\phi$, 图的下半部为归一化电压的二维方向图,上半部为沿 X 轴的一维剖面图。由图 2 可以看出,两种箔条在主瓣内的方向图还是非常相似的,在主瓣外二者的方向图略有差别。

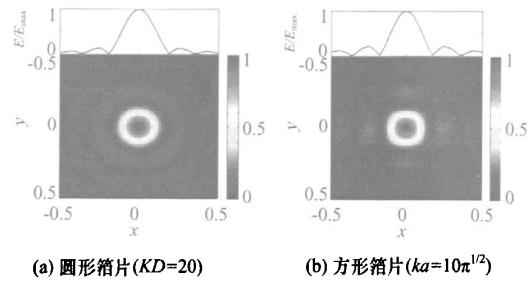


图 2 箔片的散射方向图

3 箔片云团 RCS 的统计特性

3.1 单个箔片的平均 RCS

箔片的散射敏感于箔片的姿态,如果箔片的姿态满足一定的统计分布,那么单个箔片的平均 RCS 可以通过下式来获得^[5]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{\max} \int_{\Omega} F^2(\theta, \phi) w(\Omega) d\Omega = \eta \sigma_{\max} \quad (5)$$

式中, Ω 为立体角。单个箔片平均 RCS 的频率特性取决于两方面:一方面,箔片的最大 RCS 反比于 λ^2 ,随着频率的增大而增加;另一方面,当频率增加时,箔片的方向性变得更强,权因子 η 将变小。

箔片的指向如果满足均匀分布,那么:

$$w(\Omega) = 1/(2\pi), d\Omega = \cos\theta d\theta d\phi, \theta \in [0, \pi/2], \phi \in [0, 2\pi] \quad (6)$$

对圆形箔片, $\sigma_{\max} = 4\pi A^2 / \lambda^2$, $A = \pi L^2$, L 为箔片的半径,那么在箔片空间姿态完全随机的假设下式(5)所得的结果为:

$$\bar{\sigma} = [F(\{1/2\}, \{2, 3\}; -(kD)^2) - 1/3 \cdot F(\{3/2, 3/2\}; \{2, 5/2, 3\}; -(kD)^2)] \sigma_{\max} = \eta \sigma_{\max} = \mu A \quad (7)$$

式中, $F(\cdot)$ 为超几何函数。对方形箔片,式(5)很难求得解析公式,不过可以用数值积分的方法求得。图 3 给出了圆形箔片和等面积方形箔片的 $\bar{\sigma}/A$ 随 kL 的变化曲线。由图 3 可见, $\bar{\sigma}/A$ 随 kL 呈良好的线性关系,即箔片的平均 RCS 与 λ 成反比,并且同面积的圆形和方形箔片其平均 RCS 相差不大。用直线对图中

的曲线进行逼近,可得:

$$\bar{\sigma} \approx 0.5(2\pi A^{3/2})/\lambda \quad (8)$$

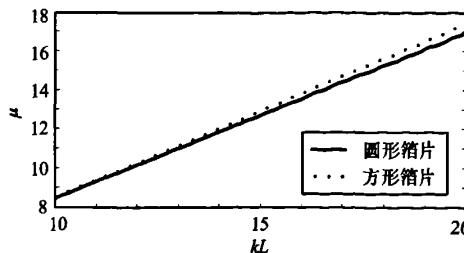


图 3 箔片的平均 RCS 随 kL 的变化关系

上述分析结果表明:尽管单个箔片的最大 RCS 反比于波长的平方,但箔片的平均 RCS 却近似反比于波长的一次方,且等面积的圆形箔片和方形箔片的平均 RCS 相差无几。

3.2 箔片云团电磁散射的统计特性

箔片取向的变化及箔片在空中的运动,使每个箔片散射信号的振幅和相位都是随机变量。假设箔片云中的箔片数目为 N , 每个箔片的极化散射矩阵为 $S_i(\theta_i, \phi_i)$, 绝对相位为 ϕ_i , 单个箔片电磁散射的相位 ϕ_i 服从 $[-\pi, \pi]$ 范围内的均匀分布。假设箔片的姿态彼此独立,即箔片散射信号的振幅 a_i 互相独立,并且回波的相位 ϕ_i 也相互独立,那么根据大数定理,依照文献[3]类似的推导,可以得到每个极化通道下箔片云团的幅度和相位满足以下分布:

$$p(A, \phi) = \frac{A}{\pi N \bar{\sigma}} \exp\left(-\frac{A^2}{N \bar{\sigma}}\right) \quad (9)$$

式中, N 为箔片的数目。进一步可得振幅和相位的边缘分布,即:

$$p(A) = 2A/(N \bar{\sigma}) \exp[-A^2/(N \bar{\sigma})], 0 \leq A \leq \infty \quad (10)$$

$$p(\phi) = 1/(2\pi), \phi \in [0, 2\pi] \quad (11)$$

由式(10)~(11)可见,箔片云的总散射场的振幅服从瑞利分布,相位服从均匀分布,并且整个箔片云团散射回波的幅度和相位是独立的。箔片云的雷达截面 $\sigma_T = A^2$, 根据式(10)可得箔片云 RCS 的概率密度函数为:

$$p(\sigma_T) = 1/\bar{\sigma}_T \exp(-\sigma_T/\bar{\sigma}_T) \quad (12)$$

式中, $\bar{\sigma}_T = N \bar{\sigma}$ 。这表明,当一个雷达分辨单元内箔片的数目满足中心极限定理时,箔片云团的 RCS 服从均值为 $N \bar{\sigma}$ 的指数分布。

4 结束语

本文通过物理光学法,得到了箔片的电磁散射特性,结合箔片姿态随机分布的假设,给出了圆形和方形等不同形状箔片的平均 RCS 计算公式,讨论了箔片平均 RCS 随频率的变化关系,得到了箔片平均 RCS 的近似计算公式。在此基础上,推导得到了箔片云团电磁散射的统计特性。本文的结论对于箔片云团干扰效果的预估具有一定的参考意义,对于无源干扰战术的制定具有一定的理论指导作用。但本文的电磁计算尚没有考虑边缘的绕射,这有待在下一步的工作中继续加以完善。■

参考文献:

- 1 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- 2 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- 3 赵勤杰, 陈静. 箔条云电磁散射统计特性研究[J]. 电子对抗, 1990(3): 1~10.
- 4 沈允春, 谢俊好. 箔条回波的统计特性[J]. 电波科学学报, 1997, 12(1): 108~111, 122.
- 5 李金梁, 王雪松, 李永楨. 正态空间取向箔条云的极化特性[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 389~395.
- 6 张民, 吴振森, 郭立新. 新型箔条云团双站电磁散射计算方法研究[J]. 电波科学学报, 2000, 15(3): 304~307.
- 7 张民, 吴振森, 薛谦忠. 大数量高密度圆形箔片云团双站电磁散射特性[J]. 电子学报, 2001, 29(3): 364~367.
- 8 Zhang Min, Wu Zhensen, Liu Kexiang. Monte carle simulation of the EM bistatic scattering from a novel foil cloud [R]. Proceeding ISAPE 2000, Beijing: 45~49.
- 9 Suchard NS. Characteristic of foil cloud[R]. Proceeding of SPIE, 1998.
- 10 Hargur DS. Doppler effect of foil cloud and chaff cloud [R]. Proceeding of SPIE, 1998.

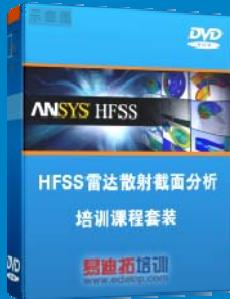
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

雷达散射截面（Radar Cross Section，简称 RCS）是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>