

不同密度分布箔条云的单站雷达截面

李 铁^{1,2}, 王纬宇³, 田 博²

(1. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710068; 2. 西安机电信息研究所, 陕西 西安 710065;
3. 陕西师范大学, 陕西 西安 710062)

摘要:首先讨论了单个箔条的单站雷达截面,推导了不同分布时箔条的平均雷达截面以及密度非均匀分布箔条云的雷达截面,计算了不同情况下具有正态密度和均匀密度分布球形和椭球形箔条云的单站雷达截面,并对计算结果进行了分析。

关键词:箔条; 箔条云; 雷达截面; 密度分布

中图分类号:O 436.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-1194(2005)01-0005-04

Monostatic RCS of Chaff Clouds with Various Density Distribution

LI Tie^{1,2}, WANG Wei-yu³, TIAN Bo²

(1. Xidian University, Xian 710068, China;

2. Xi'an Institute of Electromechanical Information Technology, Xi'an 710065, China;

3. Shannxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: This paper begins with a discussion of monostatic radar cross section of a single chaff, followed by a derivation of the average radar cross section of chaff with various distribution and the radar cross section of chaff clouds with nonuniform density distribution. A numerical calculation of the monostatic radar cross section of ellipsoidal and spherical chaff clouds with uniform and normal density distribution is presented. Finally, an analysis is made of results.

Key words: chaff; chaff cloud; radar cross section; density distribution

0 引言

箔条是使用最早、应用最为广泛的无源干扰手段之一,在现代战争中占据相当重要的地位,是各种飞机、舰船等运动目标必备的自卫干扰设备之一^[1],因此研究箔条云的电磁特性显得十分重要。最初的研究是从单根箔条和小数量稀疏云团出发,采用独立单箔条假设,并没考虑箔条之间的耦合关系。这种方法受到了小数量低密度箔条云的限制。以 Barbacz^[2]为代表的学者使用矩量法;而以 Knott^[3]为代表,采用宏观小微观大的思想把云团划

分成可计算的小单元,小单元内视为均匀分布且互不相干。这种方法可以较方便计算均匀分布箔条云团的雷达截面。由于在实际投放中的大量偶极子形成的箔条云团在空间的分布受大气运动,飞行参数等的影响,均匀分布箔条云团只能作为一种理想的假设用于一般情况,对于实际应用来说,非均匀分布箔条云的研究更有意义。本文首先讨论了单个箔条的单站雷达截面,推导了不同分布时箔条的平均雷达截面以及密度非均匀分布箔条云的雷达截面,计算了不同情况下具有正态密度和均匀密度分布球形和椭球形箔条云的单站雷达截面,并对计算结果进行了分析。

* 收稿日期:2004-12-12

作者简介: 李铁(1968—),男,陕西人,在读博士,研究方向:目标与环境电、光散射特性研究。

1 单个箔条的单站雷达截面

设单根箔条的最大雷达截面为 σ_{\max} , 偶极子位于坐标原点, 其极坐标为 (l, ϑ, φ) (图 1)。

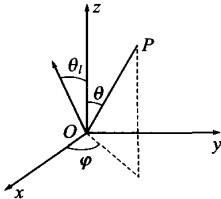


图 1 偶极子空间位置示意图

此处 l 为偶极子长度, 于是极化散射矩阵的几个分量为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_{\max} \sin^4 \vartheta \cos^4 \varphi \\ \sigma_{xy} = \sigma_{yx} &= \sigma_{\max} \sin^4 \vartheta \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \\ \sigma_{yy} &= \sigma_{\max} \sin^4 \vartheta \sin^4 \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将其用矩阵形式表示成极化散射矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \sin^2 \vartheta \cos^2 \varphi & \sin^2 \vartheta \sin \varphi \cos \varphi \\ \sin^2 \vartheta \sin \varphi \cos \varphi & \sin^2 \vartheta \sin^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

箔条云反射回波可用下式表示

$$E \cos(\omega t - \theta) = \sum_k E_k \cos(\omega t - \theta_k) = (\sum_k E_k \cos \theta_k) \cos \omega t + (\sum_k E_k \sin \theta_k) \sin \omega t \quad (3)$$

由上式可得

$$E^2 = (\sum_k E_k \cos \theta_k)^2 + (\sum_k E_k \sin \theta_k)^2 \quad (4)$$

展开(4)式右端中的分量, 考虑到各偶极子反射回波初相 θ_k 是相互独立且在 $(0, 2\pi)$ 内均匀分布的随机量, 求平均后立即可以得出

$$\bar{E}^2 = \sum_k \bar{E}_k^2 \quad (5)$$

如果箔条在空间均匀取向, 由雷达截面的定义, 其平均雷达截面为:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_i(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \quad (6)$$

式中, $\sigma_i(\vartheta, \varphi)$ 是单根箔条取向为 (ϑ, φ) 时的后向雷达截面的角分布函数, 实际的箔条云组成一般都不是均匀的, 而是呈现出某个 ϑ 角的主取向, 适当配重可以达到加强干扰来自特定角度的目的。此种云团的雷达截面分布具有明显的方向性, 常用在比较固定的任务中, 如轰炸时干扰地面向上的雷达, 或舰艇上用于干扰沿海面水平飞行的反舰导弹。

文献[4] 中给出了半波偶极子雷达截面的两种定义^[4]: $\sigma_i = \sigma_{\max} \sin^4 \theta \cos^2 \varphi$ (7)

$$\sigma_i = \sigma_{\max} \sin^4 \theta \cos^2 \varphi = \sigma_{\max} \cos^4 \psi \quad (8)$$

式中 θ 和 φ 的定义如图 1 所示, 而 ψ 是入射电场方向与偶极子的夹角, 图中电场方向为 x 轴方向, 故 $\psi = \angle pox$ 。由三角公式

$\cos \psi = \cos \theta \cos 90^\circ + \sin \theta \sin 90^\circ \cos \varphi = \sin \theta \cos \varphi$ 可证明(8)式成立。下面分几种情况求箔条单基地线极化雷达截面:

(1) 空间均匀分布线极化谐振偶极子的平均雷达截面

文献[5] 给出了一个计算公式^[5]:

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1.178(l/\lambda) - 0.131 + 0.179 \ln(22.368l/\lambda)}{[\ln(22.368l/\lambda)]^2} \quad (9)$$

式中: $l = n \frac{\lambda}{2}$, $n = 1, 2, \dots$

当 $n = 1$ 时, $\bar{\sigma}_i = 0.153 \lambda^2$ (10)

也可以用(7)式和(8)式通过求平均得到 $\bar{\sigma}_i$ 的计算式。由(7)式

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{\max} \sin^4 \theta \cos^2 \varphi \sin \theta d\theta d\varphi = 4\sigma_{\max}/15 = 0.23 \lambda^2 \quad (11)$$

由(8)式

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{\max} \sin^4 \theta \cos^4 \varphi \sin \theta d\theta d\varphi = \sigma_{\max}/5 = 0.172 \lambda^2 \quad (12)$$

由此看来用(8)式计算的结果同由较精确公式(10)计算结果较为接近。

(2) 水平面均匀分布线极化谐振偶极子的平均雷达截面

设偶极子在水平面 xoy 平面上均匀分布, 电场方向与 xoy 平面夹角为 θ_1 , 且在 xoz 平面内, 如图 2 所示。

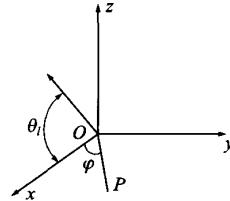


图 2 水平面均匀分布偶极子空间位置示意图

由(8)式

$$\bar{\sigma}_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_{\max} \cos^4 \theta_l \cos^4 \varphi d\varphi = \frac{3}{8} \sigma_{\max} \cos^4 \theta_l \quad (13)$$

(3) 圆锥面均匀分布

设偶极子在圆锥面 $\theta = \theta_0, \pi - \theta_0, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 上均匀分布。由于对称性,因此只计算上锥面。不失一般性可令电场方向为 $(\theta_l, 0)$ 。由(8)式

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_i &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sigma_{\max} (\cos \theta_0 \cos \theta_l + \sin \theta_0 + \\ &\quad \sin \theta_0 \sin \theta_l \cos \varphi)^4 d\varphi = \sigma_{\max} \left(\frac{3}{8} \sin^4 \theta_0 \sin^4 \theta_l + \right. \\ &\quad \left. \frac{3}{16} \sin^2 2\theta_0 \sin^2 2\theta_l + \cos^4 \theta_0 \cos^4 \theta_l \right) \end{aligned} \quad (14)$$

2 非均匀分布箔条云的雷达截面

2.1 正态密度分布箔条云的雷达截面

由于各种箔条弹的结构、装填方法、爆散方式和动力学特性不同,因此,云团内的密度是非均匀分布的,在云团内部不同的部位产生不同密度的子云团使电磁场在云团内部产生变化。从而导致整个散射场的变化,在总数量不很大的情况下,可采用 Knott 方法用各子云团之和的方法得到总云团的雷达截面。

对于球形云团,箔条密度以 r_0 为圆心的球壳为密度中心沿径向呈高斯分布,箔条取向为空间各方向均匀分布,云团的散射截面为:

$$\sigma_r = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \bar{\sigma}_i \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{-\frac{(r-r_0)^2}{2D^2}} \rho \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dr \quad (15)$$

对于球心正态分布的云团可进一步简化:

$$\sigma_r = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \bar{\sigma}_i \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} e^{\beta - \frac{r^2}{2D^2}} \rho \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dr \quad (16)$$

ρ 是箔条密度; D 是分布参数,由箔条弹的结构决定; B 为遮挡系数。

(15) 式考虑了箔条之间的遮挡效应,这在大密

表 1 球形均匀/正态密度分布的箔条云团

箔条数量 (万根)	云团半径 (m)	箔条长度 (m)	箔条直径 (m)	波长 (m)	平均后向 $\sigma_\lambda (m^2)$	
					均匀分布	高斯分布
100	7	0.015	0.007	0.03	10.6	5.24
300	7	0.015	0.007	0.03	27.9	5.68
500	7	0.015	0.007	0.03	41.9	6.07
100	10	0.015	0.007	0.03	9.18	5.69
300	10	0.015	0.007	0.03	23.2	6.78
500	10	0.015	0.007	0.03	43.7	7.04
100	15	0.015	0.007	0.03	10.6	8.20
300	15	0.015	0.007	0.03	17.4	8.21
500	15	0.015	0.007	0.03	32.5	9.00

度箔条云团的情况下是引起反射能力下降的重要因素,也就是所谓的阴影效果。由遮挡理论^[6],遮挡衰减系数可表示为:

$$B = \exp \left[\int_d \rho(x) \sigma(x) dx \right] \quad (17)$$

式中, d 为遮挡阴影的厚度。

用于计算(15)式的可行叠加为:

$$\sigma_r = \sum_1^N \sum_0^M \bar{\sigma}_i(n, m) \quad (18)$$

n 代表第 n 块微云团, $\bar{\sigma}_i(n, m)$ 代表从第 m 块微云团散射到电磁波照射到第 n 块微云团后产生的雷达截面,其中 $m \neq n, m = 0$ 时代表直接入射到第 n 块微云团产生的雷达截面。

2.2 指数密度分布箔条云的雷达截面

文献[7]中讨论了球形非均匀密度分布箔条云团的相干散射模型,将非均匀性分为“内密外疏”和“内疏外密”的情况,散射模型假设了云团的非均匀性是线性分布^[7]。如果云团中波条密度以球心沿半径向外呈指数分布,即中心密度大,外面密度小,这是在扩散炸药未充分爆炸的情况下经常出现的,其雷达截面计算公式为:

$$\sigma_r = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \bar{\sigma}_i e^{B - \frac{r}{k}} \rho \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dr \quad (19)$$

k 是爆破系数,与炸药当量成正比,遮挡系数 B 见(17)式。

3 计算结果及结论

本文以球形云团和椭球形云团为例,计算了密度均匀分布和高斯分布时的单基雷达截面。计算结果如表 1、表 2 所示。

表2 椭球形均匀/正态密度分布的箔条云团

箔条数量 (万根)	云团半径(m)			箔条长度 (m)	箔条直径 (m)	波长(m)	长轴方向后向(m^2)		短轴方向后向(m^2)	
	a_x	a_y	a_z				均匀分布	高斯分布	均匀分布	高斯分布
100	7	5	5	0.015	0.007	0.03	10.6	3.37	13.5	4.05
300	7	5	5	0.015	0.007	0.03	34.6	4.18	37.6	5.20
500	7	5	5	0.015	0.007	0.03	52.2	4.13	81.2	4.85
100	10	8	8	0.015	0.007	0.03	8.74	4.56	12.4	5.41
300	10	8	8	0.015	0.007	0.03	26.4	4.90	32.5	6.4
500	10	8	8	0.015	0.007	0.03	40.9	5.71	55.9	6.77
100	15	10	10	0.015	0.007	0.03	8.45	4.97	12.5	5.56
300	15	10	10	0.015	0.007	0.03	26.0	6.00	32.7	5.89
500	15	10	10	0.015	0.007	0.03	37.7	6.47	56.3	8.14

从计算结果可以看出:不管是球形还是椭球形,箔条密度均匀分布的云团其后向雷达截面均明显大于高斯分布的云团,箔条密度越大,二者的差异越大,对半径7 m 的同样大小球形云团,500 万根箔条时均匀分布的云团其后向雷达截面几乎是高斯分布的7 倍(在椭球云团短轴方向更是几乎高达16 倍以上),而100 万根箔条时均匀分布的云团仅为高斯分布的2 倍左右;这种情况也同样出现在半径为10 m 和15 m 的更大体积云团中,不同的只是这种差别随着云团的稀疏而减小。这种现象主要是由于箔条之间的遮挡效应引起的(见(17)式)。同样,由于遮挡效应,椭球云团的长轴方向雷达截面也明显小于短轴方向,而且高斯分布时这种差别明显要小于均匀分布时的箔条云团。

对于要考虑各种极化,以及散射角、入射角、箔条相对长度对平均雷达截面的影响,可参考相关的文献。文献[8]对双基地箔条雷达截面作了相当深入的分析^[8]。文献[9]和文献[10]引入了一个高斯权函数用来反映偶极子不同分布的指向对双基地雷达截面的影响^[9,10]。文中以箔条云中心为原点的主坐标系作为基准,给出了用三维图表示的相对双基地雷达截面同接收机位置之间的关系。

参 考 文 献:

[1]林象平. 电子对抗原理(下)[M]. 北京:国防工业出版

社,1982.

- [2]Barbacz RJ, Cable V, Wickliff R. Advanced radar reflector Studies[R]. AFAI. TR - 75 - 219, AD - B013005.
- [3]Knott EF, Lewinski DJ, Hunt SD. Chaff theoretical/analytical characterization validation program [R]. AD - A105893, 1981.
- [4]Mott D L. On the radar cross section of a dipole[J]. Proc. IEEE, 1970, 58:793 - 794.
- [5]Van Vleck. J H Theory of radar reflection from wires on thin metallic strips[J]. Appl Phys, 1947, 18:274 - 294.
- [6]Mack CL, Reiffen. B RF characteristics of thin dipoles[J]. Proc IEEE, 1964, 52(5):533 - 542.
- [7]王雪松,李永祯,帅鹏. 基于相干散射模型箔条云团散射截面研究,现代雷达[J]. 2003, 25(2):5 - 10.
- [8]Peebles, P Z JR. Bistatic radar cross section of horizontally oriented chaff[J]. IEEE Trans AES, 1984, AES - 20(6): 798 - 808.
- [9]Cheng Jing. Bistatic scattering by a chaff dipole cloud[J]. Proceedings of second International Symposium on Antennas an EM Theory, 1989:52 - 53.
- [10]GuoY P , Unerall H. Bistatic radar scattering by a chaff cloud[J]. IEEE Trans Antenna Propagate, 1992, AP - 40 (7):837 - 841.

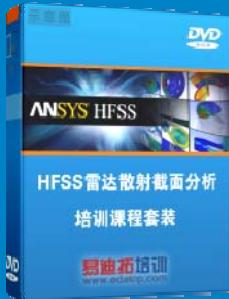
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>