

# 基于仿真技术的箔条云团 RCS 建模方法研究

赵博 田宇

(92941 部队 葫芦岛 125001)

**摘要:** 箔条云团数学模型的建立是为了对雷达散射截面进行计算。采用“层-角-角”的划分方法来对箔条云团进行划分,来建立若干个包含箔条云团特性参数的箔条单元体,利用目标与接收点处的功率密度和电场强度对这些箔条单元体有效散射面积进行计算,再将这些箔条单元体的计算结果叠加,同时考虑它们之间的相互作用和阴影效应,最后得出整个箔条云团的雷达散射截面仿真模型。计算表明,该模型可以模拟多种情况下箔条云团 RCS 值。

**关键词:** 箔条云;雷达散射截面(RCS);模拟仿真

**中图分类号:** TN95    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.8020

## Research on the RCS simulation method of chaff cloud

Zhao Bo Tian Yu

(Troop 92941, Huludao 125001, China)

**Abstract:** The establishment of a mathematical model of chaff cloud is to be calculated on the radar cross section. In this paper, “Layer-Angle-Angle” division method to be divided on the chaff cloud, to establish a number of parameters contain clouds of chaff chaff unit body, the use of power density and electric field strength and the reception point target these chaff unit body effective scattering area is calculated, and then the results of these chaff unit body superimposed, taking into account the interaction between them and shadow effects, the conclusion that the whole cloud of chaff RCS simulation model. Calculations show that the model can simulate RCS value chaff clouds many cases.

**Keywords:** chaff-cloud; radar cross section (RCS); semi-analytical method simulation

### 1 引言

在计算整个箔条云团的雷达散射截面时,由于箔条云团中包含箔条的数量非常多,如若使用纯解析法对每一根箔条建立一个方程,最后来求解方程组的话,计算机的运算量将会非常庞大,使运算难以实现<sup>[1]</sup>。所以在计算箔条云团的雷达散射截面时,需对箔条云团建立一个合适的数学模型<sup>[2]</sup>,使它在计算机中的运算更加简洁。而建立箔条云数学模型的理论基础就是把箔条云按照一定的规则划分成箔条单元体,然后逐一一对分割好的箔条单元体进行计算,最后将计算的结果进行叠加即得到整个箔条云团的雷达散射截面<sup>[3]</sup>。这种数学模型从效果和精度方面来看都是再现雷达信号反射过程的可以采用的模型<sup>[4]</sup>。目前常见的方法均存在不同的缺点:如半解析法,精度和速度取决于云团结构的复杂性和箔条数量;而介质法不能准确描述静态模型;迭

代法无法处理球型和复杂结构云团;蒙特卡洛法空间分布的精度与模拟次数有关。

采用“层-角-角”的划分方法来对箔条云团进行划分,通过对这些箔条单元体进行计算,再将这些箔条单元体的计算结果进行叠加,考虑相互之间的影响系数和阴影效应<sup>[5]</sup>。并考虑了单元体的随机反射特性,最后得出整个箔条云团的雷达散射截面仿真模型。该建模方法与其他方法比较,在相同计算结果精度条件下,可以极大提高计算箔条云团 RCS 值的计算速度,同时还可以对速度和精度要求即时调整,利用层数和角度的细致划分,适应不同的计算需要。通过模拟计算表明,该建模方法可以模拟出多种情况下雷达探测箔条云团的 RCS 值过程。

### 2 箔条云团数学模型参数

在对箔条云团进行划分和计算时,需对箔条云团的特

收稿日期:2015-07

性、雷达、计算量等方面进行参数设置,以设置好的参数作为原始数据进行计算<sup>[6]</sup>。

箔条云团的特性参数:箔条云团的数量;云团的存在方式(静止或者扩散);云团中箔条的分布方式(均匀分布或正态分布);在本地坐标系中箔条云中心的坐标;云团静止时的半径;云团扩散时的最大半径;箔条云团内中包含箔条数量;箔条的长度、直径。

单站运动雷达的参数:发射波的波长;天线类型(角天线或缝隙天线);信号的调制类型(连续波或调频波信号);调频信号最大频偏和周期;天线开始运动的位置坐标;天线的增益、功率;天线沿 X 轴运动的开始和结束位置;X 轴上的计算步数;天线运动的速度。

### 3 箔条云团数学模型的建立

针对箔条云团相对雷达位置有 3 种不同的情况<sup>[7]</sup>,分别是:

- 1) 雷达位于箔条云或箔条团的内部;
- 2) 雷达在箔条云的外面,但雷达的 X 轴通过箔条云;
- 3) 第 1 种和第 2 种情况以外的其他位置(大多数情况下的位置)。

在对箔条云团进行划分时,先根据所设定的参数进行层面划分,将箔条云团划分成层状体。之后再分别在纵切面和横切面内对其进行角划分,最后所分割而成的箔条单元体将是逐层的、扇形面积的体积(即扇形体)。

#### 3.1 对箔条云团的层状划分

将箔条云等效为一个球体,球体中心与箔条云中心点重合,其半径等于箔条云椭球最长半轴的半径,那么其距坐标原点的距离为:

$$r = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2} \quad (1)$$

式中:  $X_0, Y_0, Z_0$  箔条云中心点坐标。

箔条云椭球的最长半轴为:

$$r_{\max} = \max(r_x, r_y, r_z) \quad (2)$$

比较  $r$  和  $r_{\max}$ , 如果  $r > r_{\max}$  则说明雷达位于箔条云的外部;如果  $r < r_{\max}$  则说明雷达位于箔条云团的内部。当雷达位于箔条云团的外部时,对箔条云进行层状划分所使用的球形切割线的最初和最终半径应为:

$$\begin{cases} r_0 = r + r_{\max} \\ r_1 = r - r_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

当雷达位于箔条云团内部时,只对雷达能够扫描到的部分进行划分,那么其划分的最初和最终半径就是从雷达开始到箔条云团的表面。此时要分箔条云团的中心在 Y 轴的左边和右边两种情况来划分。当有多发箔条云团存在时,要对云团逐一划分,分别得出对它们进行划分的最初和最终半径。以雷达在云团外部时为例,对所有的箔条云的通用公式可以表示为:

$$\begin{cases} r_{1\max} = \max(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n}) \\ r_{1\min} = \min(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n}) \end{cases} \quad (4)$$

最后根据划分的层数  $n$  来求出所划分的箔条云球层的厚度,即每一个层状体的行距:

$$s = \frac{r_{1\max} - r_{1\min}}{n} \quad (5)$$

#### 3.2 对箔条云 $\alpha$ 切面的角划分

在对箔条云进行角划分时,空间极坐标的两个角度来对箔条云进行划分,为了方便计算起见分别建立切面和  $\beta$  切面。中心和 X 轴的平面作为  $\alpha$  切面,在  $\alpha$  切面中扫描角  $\alpha$  为 X 轴正半轴与雷达和箔条云团中心连线之间的夹角;箔条云团中心和 XOZ 面垂直的平面作为  $\beta$  切面。

当雷达在箔条云团内部时,雷达在  $\alpha$  角度上的整个扫描区域均有箔条存在,故此时雷达在纵切面上的扫描区间为  $[0, \pi]$ 。那么,此时纵切面上的扫描宽度即为:  $\alpha_m = \frac{(\alpha_1 - \alpha_0)}{m}$ 。当箔条云团处于一般情况时,如图 1 所示,在  $\alpha$  切面内对箔条云团进行扫描时扫描空间为  $[\alpha_0, \alpha_1]$ 。

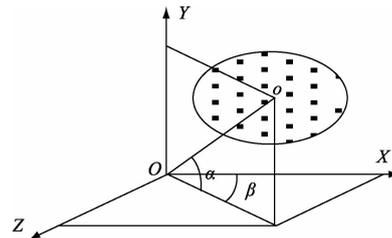


图 1 本地坐标系中的箔条云团

箔条云团的最大半轴长为:

$$r_{\max} = \max(r_x, r_y, r_z) \quad (6)$$

如图 2 所示为  $\alpha$  切面的截面图,那么在  $\alpha$  切面  $XOO'$  内,所需扫描的区间角度即为图中所示的从  $\alpha_0$  到  $\alpha_1$  之间的角度。 $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  计算通过  $\alpha_x$  和  $\alpha_y$  求得(角  $\alpha'$  是由从雷达中心出发到云团中心的直线和从雷达中心出发过云团的切线之间的夹角),计算方法如下:

$$\alpha_x = \arccos\left(\frac{|x_c|}{r_c}\right), \alpha_y = \arcsin\left(\frac{r_{\min}}{r_c}\right) \quad (7)$$

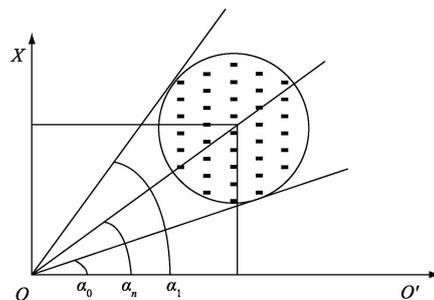


图 2 对  $\alpha$  角积分参数的计算(纵切面)

那么,扫描区间的最小和最大角度  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  分别为:

$$\alpha_0 = \alpha_x - \alpha_y, \alpha_1 = \alpha_x + \alpha_y \quad (8)$$

如果  $\alpha_0 < 0$  时,说明雷达的 X 轴的正半轴通过箔条

云团,此时雷达和箔条云团的相对位置处于上述所分的第2种情况,此时雷达在纵切面上的扫描空间为 $[0, \alpha_1]$ ;如果 $\alpha_1 > \pi$ 时,说明雷达的X轴的负半轴通过箔条云团,此时雷达和箔条云团的相对位置亦处于上述所分的第2种情况,此时雷达在纵切面上的扫描空间为 $[\alpha_0, \pi]$ 。如果 $\alpha_0 < 0$ 并且 $\alpha_1 > \pi$ 时,说明雷达的X轴的正、负半轴均通过箔条云团,此时雷达和箔条云团的相对位置亦处于上述所分的第一种情况,即雷达处于箔条云团中,此时雷达在纵切面上的扫描空间为 $[0, \pi]$ 。

最后根据划分的层数 $m$ 来求出所划分的箔条云团单元体的扫描角度,即每一个层状体的角度,此时,对于箔条云团纵切面内 $\alpha$ 角的积分区间就确定下来了:

$$\alpha_m = \frac{\alpha_{0\max} - \alpha_{0\min}}{n} \quad (9)$$

### 3.3 对箔条云 $\beta$ 切面的角划分

对 $\beta$ 角的划分要建立在在 $\alpha$ 角划分的基础上来进行,也要针对雷达对箔条云团的不同位置来进行划分,不过此时不是根据开始所述的3种情况来划分,此时的划分比对 $\alpha$ 角进行划分时要更复杂一些。

**情况1:**在雷达的X轴通过箔条云团时,在 $\beta$ 角度上所有的扫描区域均有箔条存在,故此时在纵切面上的扫描区间为 $[-\pi, \pi]$ 。那么, $\beta$ 切面上的扫描宽度为: $\beta_m = \frac{(\beta_1 - \beta_0)}{k}$ 。

**情况2:**在对箔条云团在 $\beta$ 切面上进行划分时,要特别注意这样一种情况:当箔条云团完全处于Y轴负半轴一边时,它在横切面YOZ面上投影与Y轴的负半轴相交,但与Z轴不相交。由于在这样的情况下,横截面上的扫描角度已经超出了 $[-\pi, \pi]$ 范围,但是它所超出的部分对计算结果还是有贡献的一部分,是不能将其省去的。故此可以将箔条云团的位置转移到Y轴的正半轴的半边进行运算,颠倒Z轴,以保证利用反余弦来求其角度时正负号不变。此时,求其 $\beta$ 角扫面区域的方法同下面情况3中的方法一致。

**情况3:**此为最一般的情况,箔条云团在YOZ平面上投影如图3所示。此时需计算出 $\beta_x$ (雷达中心和箔条云团中心之间连线与Y轴正半轴之间的夹角)和 $\beta_y$ (雷达中心和箔条云团中心之间连线与从雷达中心出发对箔条云团的切线之间的夹角),计算方法如下:

首先求出YOZ平面箔条云团中心到雷达中心距离 $r_c$ 和箔条云团最大半轴长 $r_{\max}$ :

$$r_c = \sqrt{x_c^2 + z_c^2}, r_{\max} = \max(r_x, r_y, r_z) \quad (10)$$

然后分别计算 $\beta_x$ 和 $\beta_y$ :

$$\beta_x = \arctan\left(\frac{z_c}{x_c}\right), \beta_y = \arcsin\left(\frac{r_{\max}}{r_c}\right) \quad (11)$$

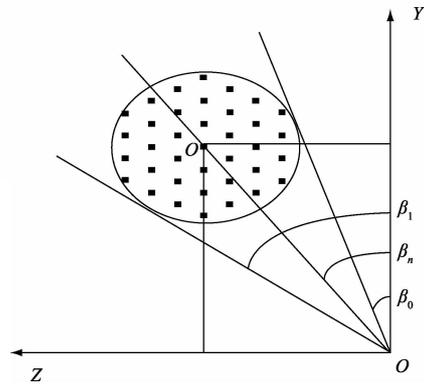


图3 对 $\beta$ 角积分参数的计算

则扫描区域的最小和最大角度 $\beta_0$ 和 $\beta_1$ 分别为:

$$\beta_0 = \beta_x - \beta_y, \beta_1 = \beta_x + \beta_y \quad (12)$$

最后根据划分的层数 $k$ 来求出所划分的箔条云团单元体的扫描角度,即每一个层状体的角度:

$$\beta_k = \frac{\beta_{0\max} - \beta_{0\min}}{k} \quad (13)$$

此时,完成了对箔条云团横切面上的 $\beta$ 角的划分。同时,对箔条云团的整体划分也已经完成,箔条云团已经根据实现设置好的云团划分参数值被划分为逐层的扇形单元体。接下来就可以对每一单元体进行运算了。

## 4 模拟计算与分析

下面使用上述建模方法模拟一个运动雷达在一个固定箔条云团下方匀速飞过的过程。通过设置不同的云团划分参数来说明不同的划分方法和精度对计算结果的影响。

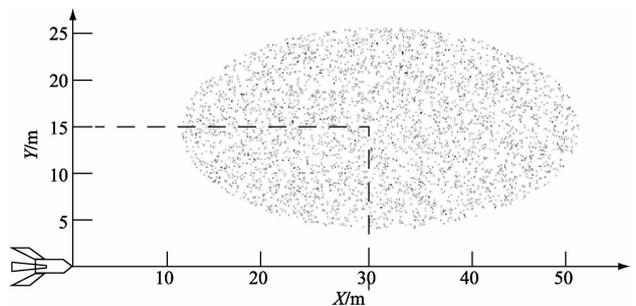


图4 运动雷达和箔条云团的相对位置

最典型的运动导弹雷达和固定箔条云团的位置关系<sup>[8]</sup>如图4所示,假设椭圆形箔条云团在外部坐标系下的中心坐标为(30, 15, 0),长轴半径为20 m,短轴半径为10 m,包含箔条50万根,箔条长度0.015 m,直径0.0005 m,云团中是均匀分布的。设一个雷达制导体制

导弹以 1 000 m/s 的速度在箔条云团下方匀速飞过<sup>[9]</sup>, 它从外部坐标系原点出发, 沿 X 轴直线飞行, 其入射波仰角为 60°, 扫描宽度为 10°, 方位角为 0°, 扫描宽度为 180°, 发射信号为单脉冲信号, 波长 0.03 m。首先, 设置对箔条云团的层面划分为 20 层, 切面划分也均为 20 个角间距进行划分, 此时我们分析雷达在 X 轴上从 0 运动到 50 时情况。

上述过程中雷达探测到箔条云团的 RCS 图形如图 5 所示。图中横轴表示雷达的 X 坐标值, 纵轴表示导弹雷达探测到箔条云团的 RCS 的值。该图可以清楚的表述出导弹在静止云团下方飞过这一过程中导弹探测到的 RCS 值的变化情况: 导弹飞行 0~34 m 时, RCS 值在 15 dB 附近上下波动, 说明箔条云团已经全部进入雷达的探测范围之内, 之所以 RCS 值不稳定, 是因为在箔条云团内部存在大量的随机现象, 每时每刻探测到的值都不可能是完全相同的; 导弹飞行 41~44 m 时, 探测到的 RCS 值逐渐减小, 由 10 dB 下降到 -30 dB, 说明此时箔条云团逐渐到导弹雷达的探测范围之外; 导弹飞行 45~50 m 时, 探测到的 RCS 值为 -30 dB, 说明测试箔条云团已经全部在导弹雷达的探测范围之外。

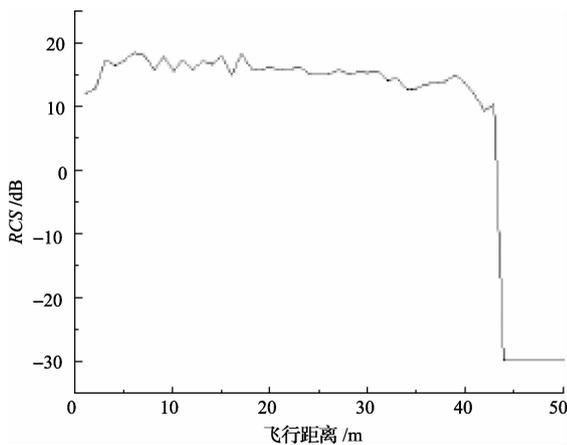


图 5 导弹在云团下方飞过的 RCS 图形

为了说明同一箔条云团进行不同划分对计算结果产生的影响情况, 取上述过程导弹飞行 0~40 m 的阶段, 其他条件保持不变。图 6 为不同的层数划分的情况; 图 7 为  $\alpha$  面上不同层数划分的情况; 图 8 为  $\beta$  面上不同层数划分的情况。从图中可以看出, 当划分层数为 10 时, 出现较严重的图形失真情况, 所以做模型的层数划分时不能将层数划分过少<sup>[10]</sup>, 此时计算结果将会出现偏差。而划分 100 和 1 000 层时, 图形基本吻合。如果模型层数划分过多, 结果基本一致, 却会白白浪费大量计算时间。当取 20 层时, 既可以反映计算结果的大致趋势, 又节省计算时间, 所以在做模型划分时, 应按照所需的精度范围和计算机时来确定划分层数。

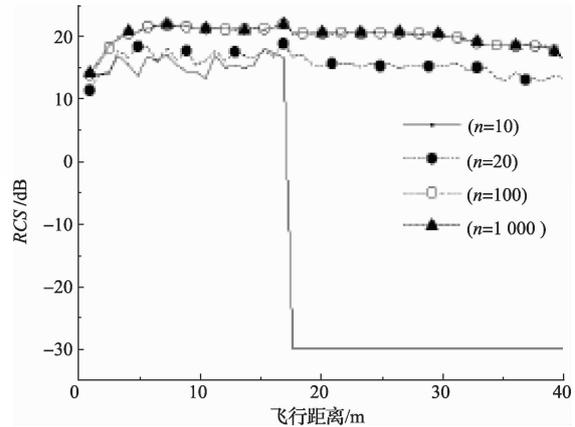


图 6 不同层数划分的 RCS 图形

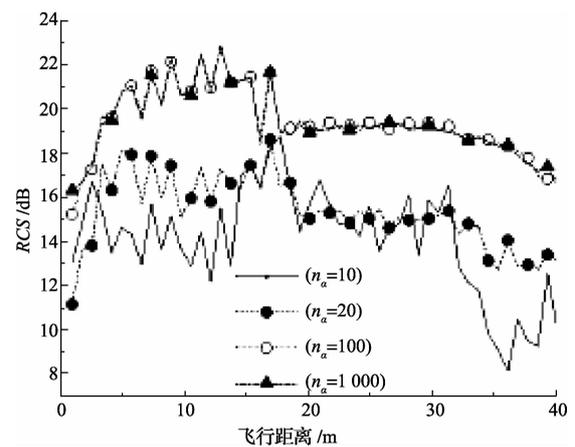


图 7  $\alpha$  面不同层数划分的 RCS 图形

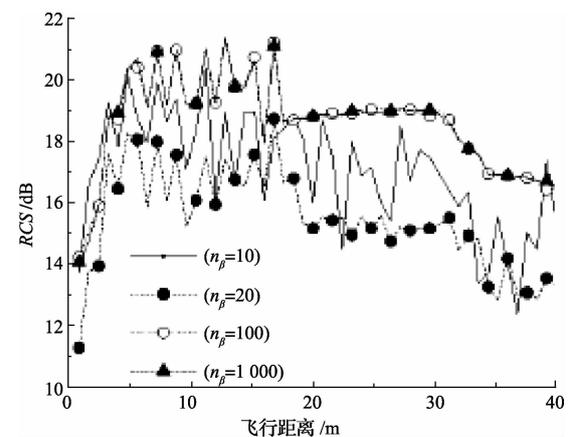


图 8  $\beta$  面不同层数划分的 RCS 图形

### 5 结论

该建模方法利用对箔条云团先划分后叠加的计算方法, 精确再现了雷达信号反射过程的数学模型, 极大提高

了计算机计算箔条云团 RCS 值的速度,且不损失计算结果精度。解决了目前常用方法或不能计算发杂模型、或不能准确描述静态模型、或不能节省计算资源的难题,该建模方法可以模拟出多种情况下雷达探测箔条云团 RCS 值的过程,还可针对速度和精度要求及时做出调整,适应了不同计算的需要,既可满足抗干扰半实物仿真试验的快速性的要求,又可满足数字仿真模型精确性的要求。

#### 参考文献

- [1] 刘强,刘以安. 箔条云回波的一种建模与仿真方法[J]. 现代雷达, 2006,28(8):91-94.
- [2] VAN VLECK J H, BLOCH F, HAMERMESH M. Theory of radar reflections from wires and thin metallic strips [J]. Journal of Applied Physics, 1947, 18(3):274-294.
- [3] 薛萍冰. 电子系统中抗干扰技术的实用经验[J]. 国外电子测量技术, 2008,27(8):69-70.
- [4] PEEBLES P Z. Bistatic radar cross section of horizontally oriented chaff [C]. IEEE Transactions on aerospace and electronic Systems, 1984: 798-809.

- [5] 丁世敬,黄刘宏,李跃波,等. 宽带扫频 RCS自动测量系统设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 61-63.
- [6] 汤广富,陈远征,赵洪钟,等. 箔条云雷达回波的一种仿真方法[J]. 光电技术应用, 2005, 20(4): 59-62.
- [7] 沈廷鳌,涂亚庆,刘翔宇. 基于相关原理的非整周期信号相位差测量算法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2153-2160.
- [8] 陶志颖,鲁昌华,汪济洲,等. 一种改进型的时空混合高斯背景建模[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9):986-990.
- [9] 韩红斌,刘少强. 基于 HFSS 对目标 RCS 的仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(3)60-63.
- [10] 吴亦文,雷斌. 基于外弹道的目标动态 RCS 仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(12):40-42.

#### 作者简介

赵博,1985年出生,工程师。主要研究方向为信息处理与制导控制。  
E-mail:20150731@qq.com

(上接第48页)

- [6] 严殿启. 潜通路分析技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(1):14-20.
- [7] 陈建云,吴光耀,冯旭哲,等. 卫星星座星间通信链路拓扑分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊2): 31-33.
- [8] 袁杰,路翠华. 基于快速傅里叶变换的调频引信噪声干扰抑制[J]. 电子测量技术, 2013, 36(10): 101-105.
- [9] 陈莉,王跃科. 相位噪声引起的双向单程测距误差研

究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2):99-104.

- [10] 余世刚,王锴,周毅,等. 高精度星间微波测距技术[J]. 宇航学报, 2006, 27(3):402-406

#### 作者简介

蔡亚星,1982年出生,硕士研究生,工程师。主要研究方向为飞行器有效载荷设计、飞行器总体设计等。  
E-mail:caiyaxing@gmail.com