

文章编号: 1671-0576(2022)01-0012-05

# 箔条扩散特性与风速研究

管有林, 孟庆良, 闫鹏武, 吕海飞

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘要:** 为提高箔条的干扰效果, 开展箔条快速扩散特性与风速关系的研究。在实际大气环境下, 箔条受风、重力、空气阻力等外部因素影响。建立箔条的运动模型, 研究不同风速下箔条的扩散特性。仿真结果表明, 风速对箔条的扩散特性有明显的影响, 可利用风速和风向增加箔条的初始速度, 提高箔条的干扰效果。

**关键词:** 箔条; 风速; 扩散

**中图分类号:** TN972+.41

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2022.01.003

## Study on Chaff Diffusion Characteristics and Wind Velocity

GUAN Youlin, MENG Qingliang, YAN Pengwu, LYU Haifei

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** In order to improve the interference effect of chaff, the relationship between rapid diffusion characteristics of chaff and wind velocity is studied. In the atmosphere, chaff is affected by external factors such as wind, gravity, air resistance. The movement model of chaff is established to study the diffusion characteristics of chaff under different wind velocity. The simulation results show that the wind velocity has obvious effect on the chaff diffusion characteristics. The velocity and direction of wind can be used to increase the initial velocity of chaff and improve the interference effect.

**Key words:** chaff; wind velocity; diffusion

## 0 引言

箔条作为电子对抗中的一种无源干扰物, 具有价格低廉、使用方便、适用范围广等优点, 在电

子战中获得了广泛的应用<sup>[1]</sup>。根据箔条的干扰原理可知, 不论是用于欺骗干扰还是压制干扰, 都需要箔条在短时间内快速扩散形成箔条云, 增大其雷达散射截面积(RCS), 以提高干扰效果<sup>[2]</sup>。箔条的快速扩散与很多因素有关, 可分为自身因素和外部因素两类。自身因素包括箔条的材质、形状、长度、厚度、半径、镀层, 以及箔条的排列、包装等。外部因素包括箔条的使用环境及投放策略。箔条弹在空中投放后被引爆, 从受力的角度分析,

收稿日期: 2021-11-03

作者简介: 管有林(1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事雷达回波建模仿真技术研究。

箔条受到重力、阻力及风力的影响。其中重力与箔条的海拔高度有关;阻力为速度的函数;风力为外部环境变量,与当地的地理气候有关。因此,研究风速这一时空变量,对研究箔条投放时的扩散效应、提高干扰效果具有重要意义。

本文采用文献[3]中的模型,根据大气环境、重力、阻力因素,对箔条进行受力分析,建立大气环境下箔条运动模型。根据文献中的风速信息,对环境因素进行分析,确定箔条自身及外部参数后进行仿真实验。通过仿真实验得出相关实用性结论,为箔条干扰对抗提供研究基础。

## 1 单根箔条模型

### 1.1 单根箔条空间受力情况

箔条弹被引爆后,形成高密度箔条云团,其箔条取向等概率均匀分布,受到大气运动(风)阻力及自身重力共同作用。 $t$ 时刻云团内任一箔条的空间受力情况和位置关系如图 1 所示。

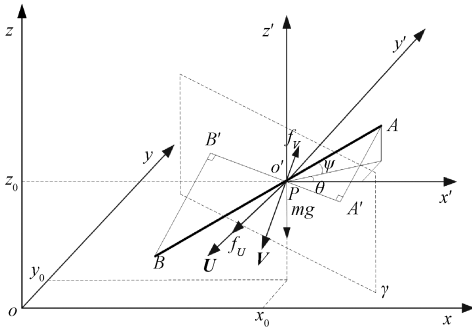


图 1 箔条空间受力及位置关系

图 1 中  $oxyz$  是地面参考坐标系,箔条几何中心  $P$  的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ 。坐标系  $o'x'y'z'$  是坐标系  $oxyz$  平移到点  $P$  的新坐标系, $\mathbf{U}$  为大气速度(风速)矢量, $\mathbf{V}$  为箔条速度矢量, $\gamma$  为垂直于  $\mathbf{V}-\mathbf{U}$  的平面, $A$  和  $B$  为箔条端点位置, $A'$  和  $B'$  分别为  $A$  和  $B$  在平面  $\gamma$  上的投影, $\theta, \phi$  为箔条空中姿态角, $f_v$  为箔条在大气运动作用下受到的力, $f_v$  为箔条在速度矢量  $\mathbf{V}$  方向上受到的阻力, $m$  为箔条质量, $g$  为重力加速度。

### 1.2 动力学模型

设  $\rho$  为大气密度, $C$  为风阻系数, $S$  为箔条投影在平面  $\gamma$  上的面积, $\mathbf{Z}$  为初值向上的单位向量。

考虑阻力和重力的影响,箔条运动的动力学方程为

$$m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\rho CS(\mathbf{V}-\mathbf{U})|\mathbf{V}-\mathbf{U}|/2 - mg\mathbf{Z} \quad (1)$$

### 1.3 大气密度及阻尼系数

海拔高度 20 km 以下,以海平面的大气密度  $\rho_0$  为基准,随高度的增加大气密度呈指数级减小。则任一高度大气密度  $\rho$  的表达式<sup>[4-5]</sup>为

$$\rho = \rho_0 \exp(aH) \quad (2)$$

其中

$$H = Rz/(R+z) \quad (3)$$

式中: $a$  为拟合系数; $H$  为与几何高度  $z$  对应的位势高度; $R$  为地球平均有效半径。

风阻系数  $C$  是表征箔条在空中受到大气阻力大小的乘性系数,为箔条形状参数和运动速度的函数,即

$$C = C_0 |\mathbf{V}-\mathbf{U}|^n \quad (4)$$

式中: $C_0$  是形状参数; $n$  是与速度相关的量。因箔条是简单规则物体,故  $C_0$  为恒定标量。而箔条在空中运动速度较慢,阻力与速度的一次方成正比,故取  $n = -1$ 。

### 1.4 投影面积解算

箔条端点  $A$  和  $B$  在平面  $\gamma$  上的投影分别为  $A'$  和  $B'$ ,且  $(\mathbf{V}-\mathbf{U}) \perp \gamma$ 。设  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  分别为点  $A$  和  $B$  在坐标系  $o'x'y'z'$  中的位置矢量,矢量  $\mathbf{B}-\mathbf{A}$  与矢量  $\mathbf{V}-\mathbf{U}$  的夹角为  $\theta$ ,矢量  $\mathbf{B}-\mathbf{A}$  与平面  $\gamma$  的夹角为  $\phi$ ,可得

$$\cos\theta = \frac{(\mathbf{B}-\mathbf{A}) \cdot (\mathbf{V}-\mathbf{U})}{|\mathbf{B}-\mathbf{A}| |\mathbf{V}-\mathbf{U}|} \quad (5)$$

$$\cos\phi = \sqrt{1 - \cos^2\theta} \quad (6)$$

则投影面积

$$S = dl \cos\phi \quad (7)$$

式中: $d$  为箔条的直径; $l$  为箔条的长度。

### 1.5 运动轨迹方程

箔条在空中运动的位移增量  $d\mathbf{L}$  是由受力引起的位移增量  $d\mathbf{L}_1$  和螺旋转动引起的位移增量  $d\mathbf{L}_2$  叠加而成的,即

$$d\mathbf{L} = d\mathbf{L}_1 + d\mathbf{L}_2 \quad (8)$$

设箔条加速度  $\mathbf{a} = [a_x \quad a_y \quad a_z]^T$ ,  $\mathbf{T}$  表示

矩阵转置运算。将式(2)、式(3)、式(7)代入式(1),并将式(1)分解为坐标系  $oxyz$  中的 3 个分量。设箔条速度  $\mathbf{V}=[V_x V_y V_z]$ ,可得受力引起的位移增量

$$d\mathbf{L}_1=[V_x V_y V_z]^T dt + \mathbf{a}(dt)^2/2 \quad (9)$$

箔条的螺旋运动引起水平位移,类似于布朗扩散运动。螺旋运动引起的位移增量

$$d\mathbf{L}_2=v[\cos\zeta \sin\zeta 0]^T dt \quad (10)$$

式中: $v$ 为箔条螺旋运动速度,服从正态分布, $v\sim N(0,\sigma^2)$ ,其中方差 $\sigma^2$ 取决于转速; $\zeta$ 为箔条在 $oxy$ 平面的投影与 $x$ 轴的夹角,在 $(0\sim 2\pi)$ 内服从均匀分布。

综合上述分析,在大气环境条件下,箔条运动的空间轨迹方程为

$$d\mathbf{L}=[V_x v \cos\zeta V_y v \sin\zeta V_z]^T dt + \mathbf{a}t^2/2 \quad (11)$$

$$\mathbf{L}(0)=[x_0 y_0 z_0]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{U}(0)=u_{x_0} \mathbf{i} + u_{y_0} \mathbf{j} + u_{z_0} \mathbf{k} \quad (13)$$

$$\mathbf{V}(0)=v_{x_0} \mathbf{i} + v_{y_0} \mathbf{j} + v_{z_0} \mathbf{k} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{L}(0), \mathbf{U}(0), \mathbf{V}(0)$ 分别为箔条初始位置、初始风速、箔条初始速度; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为 $x, y, z$ 方向上的单位矢量; $u_{x_0}, u_{y_0}, u_{z_0}$ 分别为初始风速在 $x, y, z$ 方向上的分量; $v_{x_0}, v_{y_0}, v_{z_0}$ 分别为箔条初始速度在 $x, y, z$ 方向上的分量。

## 2 风速

### 2.1 全国全年平均风速

根据全国探空资料<sup>[6]</sup>可得到四季风速与海拔关系曲线,如图 2 所示。

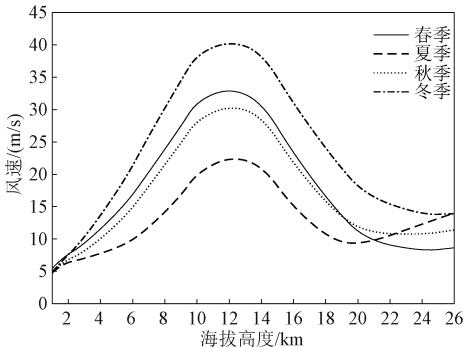


图 2 四季风速与海拔关系

由图 2 可知,全年平均风速与海拔高度有关。

海拔高度在 $(0\sim 13)$ km 范围内时,随着海拔高度增加,风速逐渐增大;在 $(13\sim 26)$ km 范围内时,随着海拔高度增加,风速逐渐减小。同时,风速表现出明显的季节性特点。风速由高至低对应的季节分别为冬季、春季、秋季、夏季。在海拔 12 km 处,冬季风速达到了夏季风速的 2 倍。

### 2.2 风速对箔条的影响

风速对箔条云团的外部作用,会影响箔条的运动速度。对箔条的雷达回波进行频谱分析,雷达回波产生了多普勒频偏。多普勒频偏 $f_D$ 的计算公式<sup>[7]</sup>为

$$f_D=2v'/\lambda \quad (14)$$

式中: $v'$ 为目标径向速度; $\lambda$ 为工作波长。

根据式(14),可得出不同风速条件下雷达工作频率与多普勒频偏的关系,如图 3 所示。

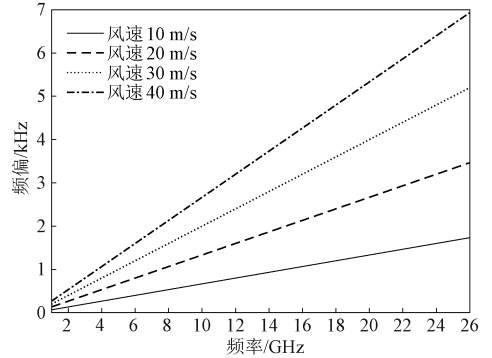


图 3 不同风速条件下雷达工作频率与多普勒频偏的关系

由图 3 可知,随着工作频率增加,波长变小,频偏变大。当工作频率为 26 GHz、风速为 40 m/s 时,产生的频偏达到了 7 kHz。考虑到风向,则频偏的范围在 $(-7\sim +7)$  kHz。因此,风速对多普勒频偏有显著的影响。

## 3 仿真条件

为验证箔条在不同风速下的扩散效应,需对其运动过程进行建模仿真,仿真参数具体包含箔条参数、气象参数和其它参数 3 部分。

### (1) 箔条参数

箔条参数如表 1 所示。

表 1 箔条参数

箔条参数	参数值
形状参数/(kg/s)	0.1
直径/( $10^{-6}$ m)	25
长度/m	0.25
密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	5.5
数量/根	10 000

## (2) 气象参数

气象参数如表 2 所示。

表 2 气象参数

气象参数	参数值
大气密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.225
高度/km	12
重力加速度/( $\text{m}/\text{s}^2$ )	9.8
拟合系数/( $10^{-4}\text{kg}/\text{m}^3$ )	-1.155
风速 1/(m/s)	-40
风速 2/(m/s)	+40

## (3) 其它参数

仿真中箔条弹由飞机发射,设飞机速度为  $700 \text{ km}/\text{h}^{[8]}$ 。箔条弹在引爆后,形成高密度箔条云团。将其等效为球体,可认为箔条沿着各个方向等概率运动。不妨设单根箔条的取向在立体角  $4\pi$  内服从均匀分布。为便于分析,设风速向量与飞机的速度向量处于同一直线上。

## 4 仿真及分析

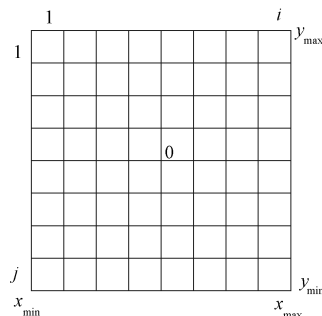
由于风速相对于机载速度较小,且箔条数量大,短时间内大部分箔条缠绕聚集,仅根据箔条的空间位置分布情况难以进行比较。为对不同时刻和不同仿真条件下箔条的扩散效应进行有效分析,可进行密度分布和平均速度仿真。对箔条的位置分布做密度分布处理,可评估不同条件下箔条的扩散效应的差异。对不同时刻箔条的速度进行仿真,可分析箔条的速度变化情况。

根据设定的仿真参数,可对箔条进行建模。将仿真中所有箔条的位置数据以三维数组  $\text{Chaff\_P}(t, 3, k)$  的形式进行存放,将速度数据以数组  $\text{Chaff\_V}(t, 3, k)$  的形式进行存放,其中  $t$  代表第  $t$  个时刻,3 代表单根箔条在坐标系  $oxy$  中空间位置或速度的 3 个分量, $k$  代表第  $k$  根箔条。

## 4.1 密度分布

设风速  $\mathbf{U} = [0 \pm 40 \ 0]$ ,由于箔条需要快速散开,故以  $0.01 \text{ s}$  为步进,进行时长为  $0.3 \text{ s}$  的仿真。在重力加速度的作用下, $0.3 \text{ s}$  内箔条在  $z$  方向上的速度变化量为  $2.94 \text{ m}/\text{s}$ ,相比于飞机速度和风速较小。为简单起见,对所有箔条的空间位置在平面  $oxy$  上的投影进行分析。

将仿真数据  $\text{Chaff\_P}(t, 3, k)$  取出,根据数据大小确定  $x$  和  $y$  方向投影区域的边界 ( $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$ ) 和 ( $y_{\min}$ ,  $y_{\max}$ ),如图 4 所示。由于箔条在引爆瞬间在各方向具有等概率运动趋势,因此可将箔条数量进行开方取整,记为  $L$ 。为使箔条投影区域的栅格精度更高,对投影区域进行细分,乘以倍数  $n$ ,则投影区域网格列数  $i = nL$ ,行数  $j = nL$ ,网格总数  $N_{\text{grid}} = ij = n^2 L^2$ 。

图 4 平面  $oxy$  空间投影栅格

对投影区域进行等间隔划分, $x$  和  $y$  方向的间隔分别为  $\Delta x$  和  $\Delta y$ ,则有

$$\Delta x = |x_{\max} - x_{\min}| / i \quad (15)$$

$$\Delta y = |y_{\max} - y_{\min}| / j \quad (16)$$

将单根箔条在  $x$  和  $y$  方向的位置区间  $x_i$  和  $y_j$  定义为

$$x_i = [x_{\min} + (i - 1)\Delta x, x_{\min} + i\Delta x] \quad (17)$$

$$y_j = [y_{\min} + (j - 1)\Delta y, y_{\min} + j\Delta y] \quad (18)$$

当箔条同时落在  $(x_i, y_j)$  区间内时,则将第  $(i, j)$  个网格中箔条的数量增加 1,通过比较可统计出所有箔条在网格中的密度分布。

## 4.2 平均速度

将风速分别设置为  $-20, 0, +20, +40 \text{ m}/\text{s}$ ,由于单根箔条的速度具有随机性, $K$  根箔条  $t$  时刻的平均速度

$$\bar{V}_t = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K V_{t,k} \quad (19)$$

其中

$$V_{t,k} = \sqrt{V_{t,x}^2 + V_{t,y}^2 + V_{t,z}^2} \quad (20)$$

式中:  $V_{t,k}$  为  $t$  时刻第  $k$  根箔条的速度;  $V_{t,x}$ ,  $V_{t,y}$ ,  $V_{t,z}$  分别为  $t$  时刻第  $k$  根箔条在  $x, y, z$  方向的速度分量。

### 4.3 仿真结果分析

通过上述处理,不同风速下平均速度与时间的关系如图 5 所示。箔条平均速度在短时间内迅速减小,且风速越大,速度下降越快。

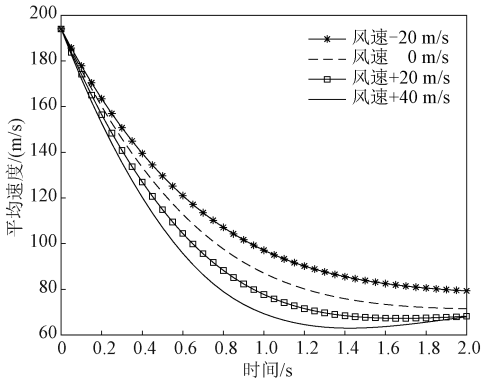


图 5 平均速度与时间关系

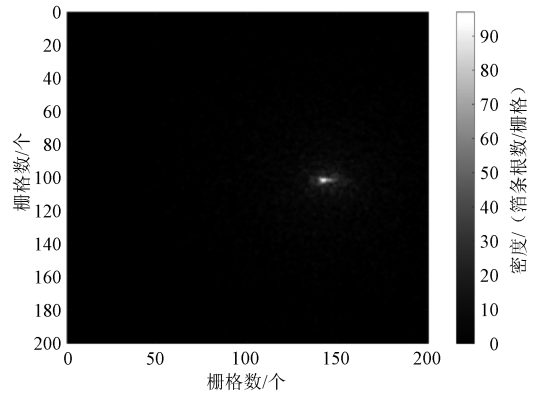
不同风速下箔条的空间密度分布如图 6 所示。可知,相比于  $-40 \text{ m/s}$  风速情况,风速为  $+40 \text{ m/s}$  时的箔条空间密度分布变小。由此可知,风速与飞机速度的合成速度越大,箔条受到的阻力就越大,导致箔条在空中运动的随机性越大、扩散速度越快。

## 5 结束语

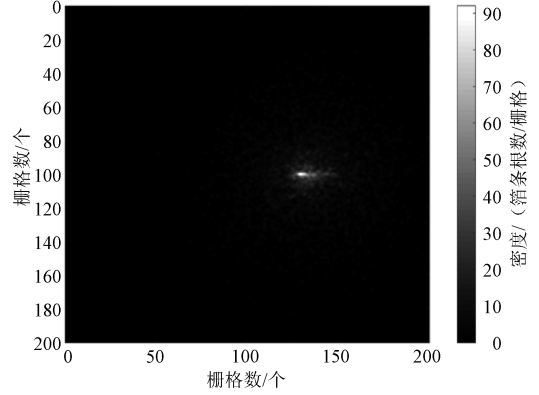
本文对箔条在不同风速条件下的扩散效应进行了研究。首先对箔条的受力及运动情况进行建模,然后对气象资料进行了简单分析,并进行了仿真实验。结果表明,不同风速条件下箔条的扩散效果表现出明显的差异。因此研究当地气象资料,根据风速、风向选择箔条弹的投放方向,增大其初速度,能提高箔条扩散速度,增强箔条弹在电子对抗中的干扰效果。

### 参考文献

[1] 唐毓燕, 杜嘉聪. 毫米波箔条弹的快速散开及其时



(a) 风速为  $-40 \text{ m/s}$



(b) 风速为  $+40 \text{ m/s}$

图 6 不同风速下箔条的空间密度分布

频特性[J]. 桂林电子工业学院学报, 1999, 19(4): 1-5.

- [2] 陈静. 雷达箔条干扰原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 263-278.
- [3] 蔡万勇, 李侠, 万山虎, 等. 大气环境下箔条运动轨迹及箔条幕扩散模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 565-569.
- [4] BERGER C, BIANCALE R, LLL M, et al. Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94-a comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(3): 161-178.
- [5] 孙云, 宋凌云, 张毅. 大气密度分层计算时的再入弹道解析解[J]. 飞行力学, 1999, 17(4): 43-48.
- [6] 任国玉, 张爱英, 王颖, 等. 我国高空风速的气候学特征[J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1583-1592.
- [7] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 7.
- [8] 陈静. 毫米波箔条弹快速散开技术研究[J]. 电子对抗技术, 1992, 7(12): 41-47.