

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.006

3 mm 波箔条、箔片干扰分析

崔怀超, 韩裕生, 王硕

(解放军炮兵学院信息工程系, 合肥 230031)

摘要: 为提高干扰效率, 对 3 mm 波箔条、箔片混合干扰进行了研究。分析了箔条、箔片混合干扰对 3 mm 波制导武器干扰的可行性, 阐述了箔条、箔片的空气动力特性、时域特性以及多普勒效应等特性, 运用箔条云回波信号的一般建模方法, 对 3 mm 箔条、箔片回波信号进行了仿真分析。从仿真结果可以看出, 箔条箔片对 3 mm 波干扰是有效的。

关键词: 3 mm 波; 箔条; 箔片; 混合干扰

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Jamming Analysis of Chaff and Foil on Three Millimeter Waves

Cui Huaichao, Han Yusheng, Wang Shuo

(Dept. of Information Engineering, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: It is the purpose of studying chaff and foil mixed on three millimeter waves (MMW) for enhancing jamming efficiency. Jamming feasibility of chaff and foil mixed on three MMW terminal guidance weapon is analyzed, the typical dissertates on aerodynamic characteristic, time domain characteristic, Doppler effect characteristic of chaff and foil, it presents a modeling and simulation method of three MMW chaff and foil echo of generation, the simulation results is valid.

Keywords: three millimeter waves; chaff and foil; jamming mixed

0 引言

箔条以价格低廉、使用频带宽、制作简单方便、干扰效果显著而被广泛应用。波长短、频带宽是毫米波制导武器的显著特点, 从干扰的角度讲, 这就使得箔条尺寸越来越小, 箔条数量增加, 箔条的空气动力特性变差, 干扰效果降低。箔片是在箔条的基础上发展起来的无源干扰物, 但箔片与箔条的散射机理不同, 是 2 个不同的散射体, 箔片是面散射体, 雷达截面与波长平方成反比, 频率超高, 雷达截面就越大, 且不受高端频率限制, 可至光学波段^[1-2]。箔片可分方形、圆形、菱形、长方形等形状, 因此与空气接触面积大, 滞空时间长。笔者主要综合了箔条、箔片干扰的优点, 分析了混合干扰的可行性, 分别对箔条、箔片干扰效果进行了仿真。

1 3 mm 波干扰的可行性

箔条干扰的实质是: 在交变电磁场的作用下, 箔条上感应交变电流, 根据电磁辐射理论, 这个交变电流要辐射电磁波, 即产生二次辐射, 从而对雷达起无源干扰作用。如表 1, 箔条的最大雷达截面为 $\sigma_{\text{箔条}} = 0.86\lambda^2$, 由公式可以看出: 箔条雷达截面与波长平方成正比, 频率上升, 波长减小, 雷达截面

就变小, 干扰效果就会下降。然而箔片与箔条的散射机理不同, 是 2 个不同的散射体。

表 1 箔条与箔片的比较

项目	箔条	箔片
截面特性	f 上升 σ 下降	f 上升 σ 上升
散射机理	谐振	反射、绕射
单位数量	多	少
散开速率	慢	快
带宽	窄	超宽
生产	毫米波难	易

箔片散射是基于惠更斯原理的波动光学, 箔片不谐振, 主要是镜面反射, 箔片最大雷达截面为 $\sigma_{\text{箔片}} = 4\pi s^2 / \lambda^2$, 由公式可以看出: 箔片雷达截面与波长平方成反比, 随频率升高, 波长减小, 雷达截面增大, 且没有空白频率。随着毫米波技术的发展, 毫米波制导武器已成为现在战场环境中的重要威胁因素, 目前各国毫米波制导武器多以 8 mm 和 3 mm 为主。比较典型的是: 美国阿帕奇武装直升机装备的“长弓海尔法”, 它是 8 mm 制导; 而英国的硫磺石 (Brimstone) 采用 Marconi 公司研制的 3 mm 雷达导引头。其信号形式为 FMCW, 发射机功率为 0.3 W, 单向圆极化发射, 双向圆极化接收, 采用卡塞格伦天线。由于箔片主要是镜面反射, 雷达截面与频率成正比, 尽管是 94 GHz 的毫米波, 箔片对该波段的毫米波制导武器仍然较为显著。

收稿日期: 2011-04-14; 修回日期: 2011-05-18

作者简介: 崔怀超(1984—), 男, 河南人, 硕士, 从事制导防御研究。

当然箔片也有不足,如若 $s < \lambda^2$ 时,箔片边缘绕射严重,与理论值有差异,反射变小;另外箔片体积大在空中易散开,密度易降低。因此箔条、箔片混合干扰是 3 mm 制导武器无源干扰的重要方式。文献[1]明确指出“箔条、箔片干扰是无源干扰的最佳干扰材料,混合使用效果更好;不同直径或宽度的箔条、箔片混装投放,横向扩散率增大 3 倍,下降速度减小 1/2”。箔条、箔片混合干扰,就是面散射体与线散射体的混合干扰,使混合弹能充分发挥两者的优点,混合弹具有以下特性:

1) 混合弹易于包装,相对密度增大。3 mm 制导武器要求箔条的长度在 1.5 mm 左右,外形接近颗粒状,长度尽管不一,但区别不大,单位体积内数量增加;而箔片的体积较大,形状各异,不受形状限制,混合操作较为简单,单位箔片体积内的密度增大。

2) 混合干扰易于扩散,迅速形成干扰云团。箔片体积相对较大,空气动力特性好,具有相当小的黏性,雷诺数高,散开迅速,理论计算小于 0.2 s。

3) 散射更加全面,雷达截面增大。单一的箔条与箔片散射都有自身的不足,而混合干扰兼顾两者优点,既有谐振散射,同时还具备波动散射,雷达截面增大(约 $10 \sim 10\,000 \text{ m}^2$) 干扰效果更佳。

4) 箔条与箔片便于垂直分离,干扰纵深拉长。3 mm 制导武器干扰箔条成颗粒状,箔片成面散射体,体积较大,空气动力特性不同,箔条下降速度相对较快,故易形成较大干扰纵深,干扰效果显著。

5) 箔条、箔片对应低频、高频,频带展宽。频率覆盖整个毫米波波段,而且连续覆盖,频宽是常规箔条弹 6 倍多。

6) 极化方式不限,对任意极化的雷达干扰都有效。

2 箔条、箔片干扰模型建立

2.1 箔条、箔片空气动力模型^[3]

箔条、箔片云团的水平运动主要由风速和风向决定。当 t 在零时刻,箔条(片)弹发射, t_1 为箔条(片)弹在空中飞行时间, t_2 为箔条(片)爆炸后箔条成云时间,箔条弹发射距离为 s ,箔条(片)弹发射方向 α ,风向为 θ ,风速对箔条(片)云运动速度的影响系数为 η_1 。箔条(片)云坐标用箔条(片)云质心点的坐标表示。当 $t \leq t_1$ 时间内的坐标为 (x_1, y_1) ,箔条云未形成,雷达反射截面积为 0,运动方程可表示为:

$$\begin{cases} x_1(t) = st / t_1 \cos \alpha \\ y_1(t) = st / t_1 \sin \alpha + v_0 t_1 \end{cases} \quad (1)$$

设 $t \geq t_1$ 时间内的坐标为 (x_2, y_2) ,此时箔条(片)云团逐渐形成,且与风向风速有关,运动方程可表示为:

$$\begin{cases} x_2(t) = v_0(t - t_1) \cos \theta + x_1(t_1) \\ y_2(t) = v_0(t - t_1) \sin \theta + y_1(t_1) \end{cases} \quad (2)$$

箔片云在空中快速散开,并绕纵轴旋转,在空气阻力的作用下,箔片不会大面积扩散,不会形成多块云,只能呈一团干扰云,可形成较好的假目标。箔片运动特性受其几何截面尺寸影响很大,当宽度增加时旋转速率增加。宽箔片还出现 3 种不同的自旋运动,箔片尺寸大,旋转速率增大,空气动力特性比箔条活跃。因此箔片角速度谱标准偏差很大,已经得到了实验验证。

2.2 箔条、箔片的回波信号的频域特性^[4]

1) 箔条回波信号的多普勒频移特性。通常情况下,箔条云团会受到重力、风速、气流等影响,以及引信运动等影响,会导致平均多普勒频移,以至于偶极子云反射信号的频谱与照射该箔条云信号的频谱是不相同的^[5]。假设箔条云偶极子各向运动等可能,则箔条回波的功率谱密度可表示为:

$$\rho(f) = (a\lambda_0 / \sqrt{8\pi}) \exp[-(a\lambda_0 f / \sqrt{8})^2] \quad (3)$$

公式(3)表明箔条回波的功率谱密度具有高斯函数形式,且当偶极子速度具有麦克斯威尔分布时,若偶极子运动各向同性,则偶极子在雷达电波方向的径向速度分布具有高斯函数形式。

由于箔条重量的不均衡性,它在空中飘动的同时必然转动,根据文献[6],当箔条的转速很高时,其反映出来的多普勒特性也是由平动引起的,而不能反映出转速的大小。如果没有水平移动,其多普勒频移也为零,也就是说,单根箔条的转动是不能产生多普勒效应的。当雷达波束照射到箔条时,在无风时其下降运动垂直与入射波方向,几乎不引起多普勒频移,但在风速的影响下,每根箔条的速度并不相同,在水平方向的部分运动分量在波束方向上产生一个频移量。则箔条平动引起的多普勒频移:

$$f_d = \frac{2v \cos \beta}{\lambda} \quad (4)$$

2) 箔片回波信号多普勒频移特性^[7]。箔片只要平面面积大于波长平方,雷达截面与波长平方成反比,箔片是面散射体,频带宽,频率超高雷达截面越大。箔片在空气、重力等影响发生平动。箔片

在空中平动时入射波与反射波的关系如图 1。当箔片接近反射方向时, 因各边长不等使 A 点反射波的方向正好是接收方向; 随后由于箔片振动变形使 B 点正好对接收方向反射。2 次反射波不仅很强而且特征很接近, 使雷达很难识别, 加上振动速度很快, 使雷达将 B 信号误为 A 信号处理。目前雷达 2 次脉冲发射的间隔时间约为 10^{-6} s, 即使是超音速飞机也仅飞 0.01 m, 此时箔片回波已移动 1 mm, 就会误认为与飞机同速。由于箔片表面光滑且导电尺寸大, 其上的邻近区域显然反射特性很接近, 即使移动距离很小甚至在原地振动, 雷达也会误认为移动了很大距离。其反射波的多普勒频移为:

$$\Delta f = 2\bar{v} \cdot (-\vec{i}) \cdot 2\pi / \lambda \quad (5)$$

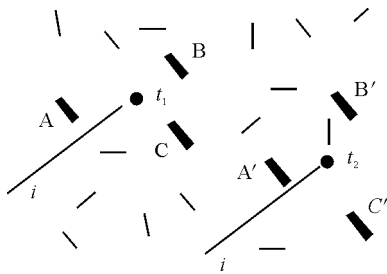


图 1 箔片平动时入射波与反射波的关系

因箔片本身尺寸和重量不均衡, 在空中平动的同时必然转动, 又因箔片表面光滑、导电性好, 对电波的反射规律与几何光学相似。由图 1 可见, 箔片距雷达较远时对电波的反射与其稍偏离垂直入射角时对反射能量急剧下降的规律, 使雷达很难探测, 直至旋转 180° 后再出现回波, 这段时间约有 10^{-2} s, 此时雷达已发射 10^4 个脉冲。而多普勒雷达是从多个脉冲回波来计算频率, 受内存速度限制最多累积 100 个脉冲, 此时雷达已丢失原来目标。因此箔片只转动不产生多普勒频移。

2.3 箔条、箔片回波信号建模

通常情况下, 常用的雷达信号为窄带信号, 其带宽远小于中心频率, 其发射信号可以表示为:

$$y(t) = \text{Re}[u(t) \exp(j2\pi f_0 t)] \quad (6)$$

式中: Re 表示取实部; $u(t)$ 为调制信号的复数包络; f_0 为雷达入射波的中心频率。当雷达处于脉冲工作状态时, 简单脉冲波形时的调制信号 $R(t)$ 可以写成

$$R(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}((t - nT_s) / w) \quad (7)$$

式中: rect 表示矩形函数; w 为脉冲宽度; T_s 为脉冲重复周期。可见, $R(t)$ 作用是使雷达入射波工作

在脉冲状态, 且脉宽为 w 脉冲重复周期为 T_s 。故可以简化雷达入射波的模型而不考虑雷达的脉冲状态, 设雷达发射信号为 $y(t)$ 。则根据上述模型, 对箔条、箔片云回波进行模拟^[4]:

1) 令 z 为一组服从正态分布的随机向量, 均值为 0, 方差为 δ 。其中包含分辨单元内箔条的根数多少, 其中包含 n 个元素 z_i (n 为一个雷达分辨单元内箔条的根数), $i=1, 2, \dots, n$, 则对第 i 根箔条、箔片的速度起伏引起的多普勒频移为 $f_{di}=2w_i/\lambda$ 。

2) 第 i 根箔条的多普勒频移为: $f_{di}=\Delta f+f_{di}$, 其中 Δf 为平动引起的多普勒频移, 箔条与箔片的多普勒频移有所差别。

3) 第 i 根箔条的回波信号为 (由于箔条回波信号的复包络的固定延迟对箔条回波的分布和统计特性没有影响, 不考虑延时因素, 简化了回波模型):

$$y_{i}(t) = \text{Re}[\exp(j2\pi(f_0 + f_{di})t)] \quad (8)$$

4) 3 mm 箔条、箔片云回波的信号为

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^m y_i(t) \quad (9)$$

2.4 仿真效果

设 $n=5000, f_0=500$ Hz, $\Delta f=60$ Hz, $\delta=20, \lambda=0.003$, 在 Matlab2009 上的仿真结果, 如图 2、图 3。

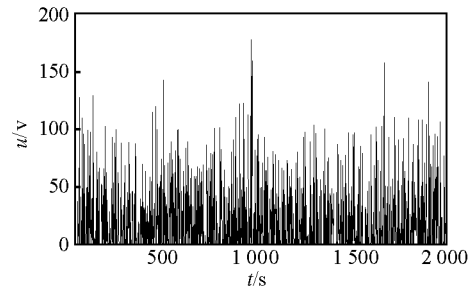


图 2 $\lambda=0.003$ 回波时域信号

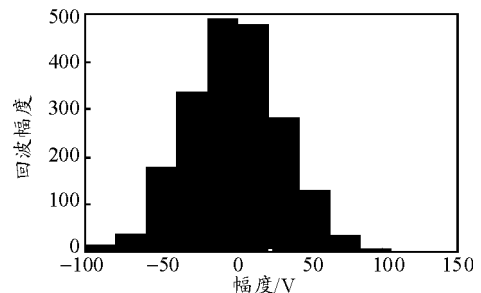


图 3 时域信号直方图

从图 2 和图 3 的仿真结果可以看出: 箔条、箔片回波信号的幅度服从瑞利分布, 这与箔条、箔片实际回波的时频分布是一致的, 可以看出箔条、箔片对 3 mm 的回波信号强度十分明显。