

文章编号: 2095-4980(2020)01-0030-07

基于微动特性的单根箔条回波信号时频特性

王 哲, 江 舸, 经 文, 蔡英武

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对箔条微动对回波信号调制的问题, 提出一种单根箔条回波构建方法。首先建立单根箔条的典型微动模式的运动学方程, 然后基于散射中心对该微动模式下的单根箔条回波进行仿真, 最后通过时频方法对单根箔条回波信号的微动变化规律进行分析。仿真结果表明, 建立的单根箔条微动模型能够有效地反映箔条回波信号的微动特性, 为精确建立箔条云回波模型提供了技术支撑, 并为有效识别箔条干扰、改善雷达性能提供了理论依据。

关键词: 单根箔条; 回波信号; 时频方法; 微动特性

中图分类号: TN972⁺.41

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018204

Time-frequency method of single chaff echo signal based on micro-motion characteristics

WANG Zhe, JIANG Ge, JING Wen, CAI Yingwu

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: For the problem of chaff micro-motion on echo signal modulation, a single chaff echo construction method is proposed. Firstly the kinematic equation of a typical micro-motion mode of single chaff is established. Then, the single chaff echo in the micro-motion mode is simulated based on the scattering center, and finally the law of the micro-motion change of the chaff echo signal is analyzed by the time-frequency method. The simulation results show that the single chaff micro-motion model established in this paper can effectively reflect the micro-motion characteristics of the chaff echo signal, provide technical support for accurate establishing of the chaff cloud echo model, and provide theoretical basis for effectiveness of chaff jamming recognition and improvement of radar performance.

Keywords: single chaff; echo signal; time-frequency method; micro-motion characteristics

箔条干扰由于成本低廉、使用方便, 已经成为使用最广泛的雷达无源干扰手段。近代战争中的多次成功使用, 证明了箔条干扰在欺骗雷达、降低雷达目标识别能力方面有显著作用, 这对雷达的性能提出了严峻挑战, 如何对抗箔条干扰是雷达面临的重要问题之一。箔条的回波特性研究对箔条干扰技术至关重要。文献[1-2]研究了箔条云雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的概率分布特性, 建立了箔条云 RCS 的统计模型; 文献[3-4]将箔条云回波视为各箔条回波的相干叠加, 对单根箔条进行了电磁学建模并获得了回波数据; 文献[5-6]考虑了单根箔条运动状态随时间的变化, 并研究了其变化规律对箔条回波的影响; 国内外对箔条的回波特性已有较为广泛的研究, 但一般只考虑箔条平动造成的多普勒频移和频谱展宽, 而忽略了箔条微动对箔条回波信号的影响。针对上述问题, 本文首先对稠密大气中单根箔条受到的大气阻力进行分析, 结合单根箔条的空中动力学特性, 给出了基于微动的单根箔条运动方程; 然后建立了考虑微动的单根箔条回波信号模型, 并对典型情况下的单根箔条回波信号进行仿真; 最后利用时频分析方法对单根箔条的微动特性进行分析。

1 单根箔条运动方程的建立

通常情况下, 箔条在空中的运动可分为 2 个阶段^[7]: 阶段一, 箔条弹发射后经 T_0 时间到达炸点, 在此阶段

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-11-19

基金项目: 重点基金资助项目(61406190101)

作者简介: 王 哲(1995-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。email:363023694@qq.com

内, 箔条的运动轨迹较为简单且速度衰减较小; 阶段二, 箔条弹在空中炸开后迅速形成分布在一定范围的箔条云团, 垂直方向上箔条在重力及空气升力作用下逐渐变为匀速运动。

由于阶段一的持续时间相对较短, 且对雷达的干扰能力很弱, 因此, 本节基于低雷诺数流理论, 仅对单根箔条阶段二稳定运动模式下的运动过程进行分析, 给出稠密大气中单根箔条的整体运动模型, 并根据该模型进行计算机仿真。

1.1 基于低雷诺数流理论的箔条平动方程

假设箔条沿轴向的来流速度为 u , 垂直轴向的来流速度为 v , 根据低雷诺数流及流体力学理论, 箔条所受的大气阻力在平行和垂直于箔条轴向的分量分别为:

$$F_{\perp} = \frac{4\pi\mu l}{\ln\left(\frac{l}{r_c}\right) + 0.5}(-v_{\parallel}\cos\theta + v_{\perp}\sin\theta); F_{\parallel} = \frac{2\pi\mu l}{\ln\left(\frac{l}{r_c}\right) - 0.5}(v_{\parallel}\sin\theta + v_{\perp}\cos\theta) \quad (1)$$

其中, 以细长圆柱形箔条为例, l 为箔条的长度, r_c 为箔条的半径, μ 为箔条当前高度下的空气粘性系数。以垂直向上为 z 轴, 以箔条初始抛撒位置在地面的投影为坐标原点 o , 以正北为 x 轴, 以正东为 y 轴, 建立全局坐标系。另假设箔条的方位角为 φ , 俯仰角为 θ , 则箔条的空间位置示意图如图 1 所示。

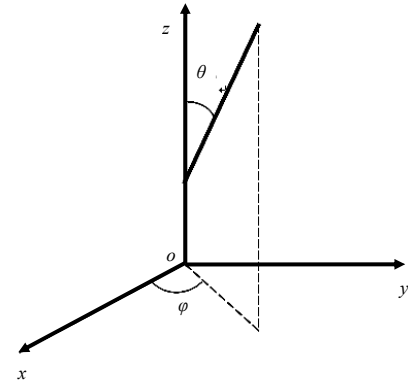


Fig.1 Schematic diagram of chaff's spatial position
图 1 箔条的空间位置示意图

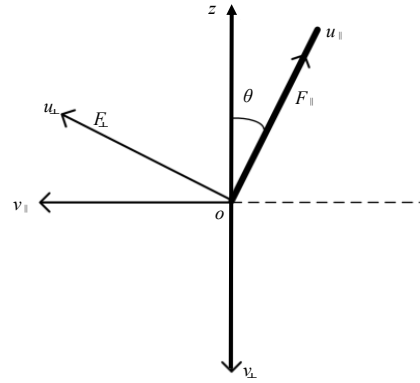


Fig.2 Analysis chart of chaff's space stress
图 2 箔条的空间受力分析图

设平稳姿态下箔条的运动速度在水平方向上的分量为 $v_{\parallel}$, 在竖直面内的分量为 $v_{\perp}$, 则其空间受力分析图如图 2 所示。由平稳姿态下箔条的受力平衡以及运动速度与来流速度间的关系^[6]可得:

$$\begin{cases} v_{\perp} = \frac{g(\rho_{\text{chaff}} - \rho_{\text{air}})r_c^2}{6\mu} \left\{ \left[\ln\left(\frac{l}{r_c}\right) - \frac{3}{2} \right] \cos^2\theta + \left[\ln\left(\frac{l}{r_c}\right) + \frac{1}{2} \right] \right\} \\ v_{\parallel} = \frac{g(\rho_{\text{chaff}} - \rho_{\text{air}})r_c^2}{6\mu} \sin\theta \cos\theta \left[\ln\left(\frac{l}{r_c}\right) - \frac{3}{2} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_{chaff} 为箔条密度; ρ_{air} 为当前高度的大气密度; g 为重力加速度。

1.2 伴随微动的箔条整体运动方程

实际应用中, 由于箔条弯曲、制作工艺、形状等其他影响因素的存在^[8], 箔条下降过程中, 方位角 φ 会发生变化, 使得箔条在水平方向上不再是简单的速度大小在改变, 其速度的方向也在改变, 从而表现出一定的微运动。大量实验观察结果表明, 稠密大气环境下箔条平稳姿态下的微动下降模式主要有 6 种^[9-10], 如图 3 所示。其中, 螺旋下降的模式出现较为频繁, 这是由于箔条在空中下降时由于空气阻力、风力等原因, 无法保持绝对平直, 会出现轻微的纵向弯曲所引起的。

下面给出箔条螺旋模式下降的微动方程。设箔条在水平面内作圆周运动的角速度为 ω , 半径为 R , 则箔条的方位角 $\varphi_t = \varphi_0 + \omega t$ 。以箔条圆周运动的圆心为原点 o' , 以坐标原点和初始时刻箔条的位置的连线为 x 轴, 建立局部坐标系 $x'o'y'$, 如图 4 所示。假设箔条初始时刻位于 $\mathbf{r}_o = (x_o, y_o, z_o)^T$, 则箔条 t 时刻在 $x'o'y'$ 内的位置为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ -\sin\omega t \end{bmatrix} \quad (3)$$

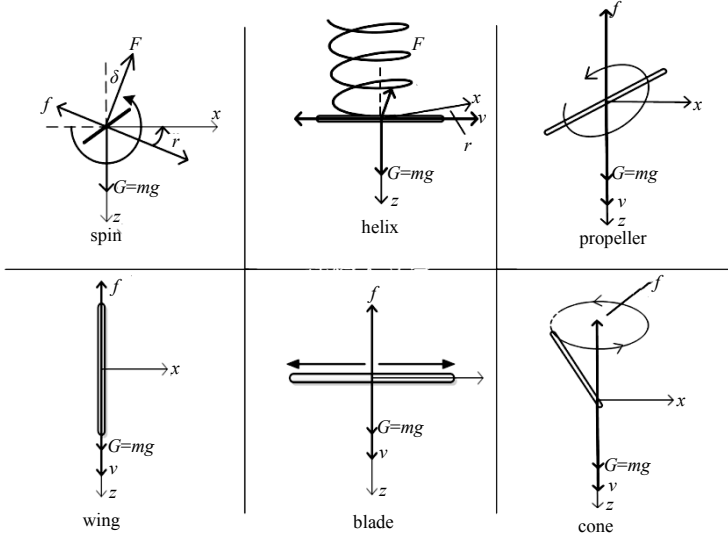


Fig.3 Six descending modes under the steady posture of chaff
图 3 箔条平稳姿态下的 6 种下降模式

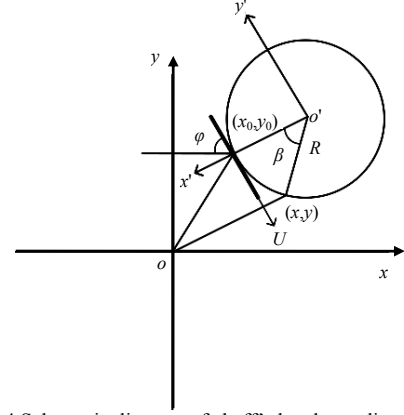


Fig.4 Schematic diagram of chaff's local coordinate system
图 4 箔条局部坐标系示意图

通过坐标转换公式可得箔条在 xoy 内的坐标为：

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi & \cos \varphi \\ -\cos \varphi & \sin \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得：

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = -2R \sin \frac{\omega t}{2} \begin{bmatrix} \cos(\varphi - \frac{\omega t}{2}) \\ \sin(\varphi - \frac{\omega t}{2}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

在以上分析中，并未考虑风力对单根箔条运动的影响。若考虑当地风速 v_w ，则水平方向上的速度不仅包括箔条水平运动的速度，还包括空气流动的速度。研究表明，有风情况下单根箔条的水平运动可以近似认为是无风情况下叠加一个由风引起的整体平移运动，其速度、方向均与风速、风向相同，有：

$$\begin{cases} v_{||x} = v_{||} \cos \varphi + v_{wx} \\ v_{||y} = v_{||} \sin \varphi + v_{wy} \end{cases} \quad (6)$$

1.3 典型微动的仿真结果

根据美国海军军用箔条规格，仿真中设置的箔条密度 $\rho_{\text{chaff}} = 2550 \text{ kg/m}^3$ ，半径 $r_c = 12.7 \text{ } \mu\text{m}$ ，长度 $l = 0.05 \text{ m}$ ；其他部分参数为 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ， $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。将上述参数代入式(2)，可得箔条下降速度 $v_{||}$ 的变化范围约为 $0.41 \sim 0.72 \text{ m/s}$ ，与文献[6]中的实测数据基本一致。

取 $\theta_0 = \pi/6$ ， $\varphi_0 = \pi/3$ ， $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ ， $v_{wx} = 0 \text{ m/s}$ ， $v_{wy} = 10 \text{ m/s}$ ，代入式(5)~式(6)，可得全局坐标系下的单根箔条运动轨迹如图 5 所示，与图 3 中的旋转下降模式相吻合。

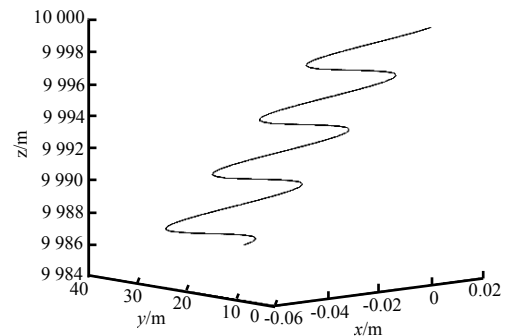


Fig.5 Simulation diagram of chaff's downward rotating mode
图 5 箔条旋转模式下下降仿真示意图

2 箔条微动的回波信号模型

2.1 单根箔条在雷达坐标系中位置的换算

为了模拟单根箔条回波信号，需得到各散射中心点在雷达坐标系下的三维坐标。本文从目标等效散射中心模型出发^[11]，对单根箔条平稳姿态下的旋转运动模型进行建模，分析各坐标系之间随时间的变化关系，利用坐标转换公式计算得到各散射中心点在雷达坐标系中的位置。如图 6 所示，雷达坐标系 (X_r, Y_r, Z_r) 的原点为 Q ，参

考坐标系(X_c, Y_c, Z_c)即为 1.1 节中箔条的全局坐标系, 其原点与箔条坐标系的原点相同, 轴线方向与雷达坐标系方向相同。参考坐标系由箔条坐标系依次绕 z, x, y 轴旋转角度 ξ, γ, ψ 得到。坐标转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \text{Rot}(\xi, \gamma, \psi) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:

$$\text{Rot}(\xi, \gamma, \psi) = R_y(\psi) R_x(\gamma) R_z(\xi) \quad (8)$$

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_y(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R_z(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi & 0 \\ \sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

设某散射中心点 B 在箔条坐标系上的位置 $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$, $\mathbf{r}_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ 为目标质心在参考坐标系中对应的向量。通过坐标转换矩阵的级联即可得到, 雷达到该中心点 B 的位移向量可表示为:

$$\mathbf{R}_t = \overrightarrow{QO} + \overrightarrow{OB} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{r}_c = \mathbf{R}_0 + \text{Rot}(\xi, \gamma, \psi) \cdot \mathbf{r}_0 \quad (12)$$

箔条绕参考坐标系中定向轴以角频率 Ω 进行旋转, 旋转轴在参考坐标系中的方位角、俯仰角分别为 φ 和 θ , 其对应的斜对称矩阵 $\hat{\omega}$ 为:

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin \theta & \sin \varphi \cos \theta \\ \sin \theta & 0 & -\cos \varphi \cos \theta \\ -\sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

箔条 t 时刻的旋转矩阵 $\mathbf{R}_t$ 可表示为:

$$\mathbf{R}_t = \exp(\Omega \hat{\omega} t) = \mathbf{I} + \hat{\omega} \sin \Omega t + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \Omega t) \quad (14)$$

2.2 单根箔条的回波信号模拟

假设雷达发射载频为 f_c 的单频连续波信号:

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c t) \quad (15)$$

则散射点 B 的回波信号为:

$$s_r(t) = A \exp \left\{ j2\pi f_c \left[t - \frac{2r(t)}{c} \right] \right\} \quad (16)$$

式中: $r(t)$ 为目标质心相对于雷达位移的距离; A 为经箔条反射后的回波衰减系数, 这里简单处理设定为 1。相位项 $\Phi(t) = 2\pi f_c \frac{2r(t)}{c}$, 对相位项关于时间 t 求导, 可得回波的多普勒频率 f_d 为^[8]:

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{2f_c}{c} \frac{dr(t)}{dt} = \frac{2f_c}{c} \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt} (\mathbf{R}_t \mathbf{r}_c) \right]^T \mathbf{n} \quad (17)$$

式中 $\mathbf{n} = (\mathbf{R}_0 + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_t \mathbf{r}_c) / \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{v}t + \mathbf{R}_t \mathbf{r}_c\|$ 为 $\overrightarrow{QB}$ 的单位向量, 本文仿真中由于箔条目标位于雷达远场, 有 $\|\mathbf{R}_0\| \gg \|\mathbf{v}t + \mathbf{R}_t \mathbf{r}_c\|$, 故认为 $\mathbf{n} \approx \mathbf{R}_0 / \|\mathbf{R}_0\|$ 。由式(17)可以看出, 第一项为箔条目标主体由风力作用下的平动所引起的多普勒频率, 第二项为箔条目标旋转所引起的微多普勒频率, 即为箔条除主体运动之外的微运动, 二者共同决

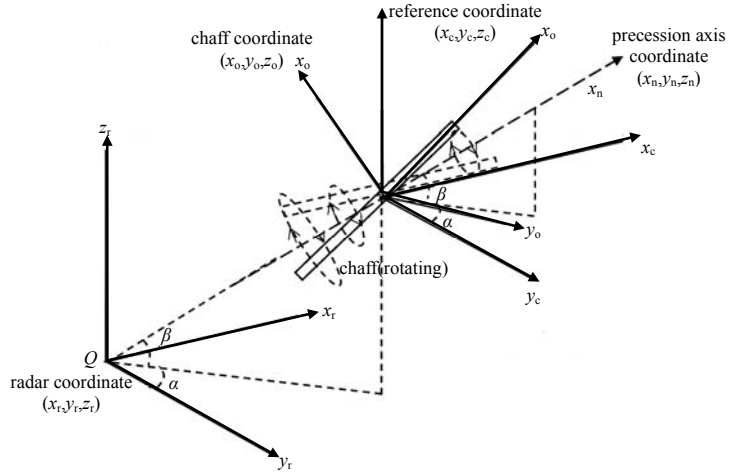


Fig.6 Coordinate system of radar and chaff
图 6 雷达坐标系和箔条坐标系

定箔条目标回波的多普勒频移和展宽。

3 单根箔条回波仿真及微动特性分析

3.1 基于时频分析的微动特性描述方法

箔条的微动本质上是一种非匀速运动或非刚体运动^[12-13]，目标微动特征信号具有非线性和非平稳的特点。因此，对箔条目标的微动特征分析和处理的核心问题是对时变信号的处理，传统的傅里叶变换分析方法在时间和频率上缺乏定位功能。本文采用时频分析方法中典型的短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)方法对单根箔条的回波信号进行了仿真分析，其算法流程图如图 7 所示。STFT 时频分析方法是一种用时间和频率的联合函数来表示信号的方法，可以在时域和频域 2 个方面同时描述时变信号的局部特征^[14]。箔条回波信号的时频图往往反映了箔条上各散射中心的多普勒变化历程，箔条微动的时频图往往呈现周期性的特点，并且与箔条的微动周期相同，当雷达视线与箔条对称轴的夹角 θ 达到极值时，各个散射中心的径向速度都为 0，时频图上的各条曲线出现交叠。因此，时频图研究箔条运动目标成像和微动特征提取提供了一种有效途径，通过时频分析得到的微动特征为箔条目标识别提供了依据。

需要说明的是：1) 由于箔条的质心运动会使距离像序列发生倾斜，多普勒值和距离多普勒像序列发生偏移，因此在微动分析前需先进行平动补偿；2) 由于箔条等效视线转速不均匀，多普勒像和距离多普勒像的横向积累时间不能过长，否则会因为积累时间内转速变化过大造成图像模糊，因此在上面的流程图中，均认为在短时间内箔条等效视线转速近似不变。

3.2 仿真结果

本文以 S 波段雷达信号为例，对仿真的动态箔条回波信号进行了特征分析，将从箔条回波信号估计出的微动参数与仿真回波信号时设置的微动参数进行比较，从而验证箔条动态回波信号中微动特征的有效性。

假设参考坐标系原点位于雷达坐标系中 2 000 m, 3 000 m, 5 000 m 处，发射信号频率 $f_c = 3$ GHz。箔条的初始位置位于箔条坐标系中的(0,0,1)m 处，在参考坐标系中的位置由其依次绕 z, x, y 轴旋转角度 $\xi = 30^\circ, \gamma = 30^\circ, \psi = 45^\circ$ 得到。箔条旋转轴在参考坐标系中的方位角 $\varphi = 45^\circ$ ，俯仰角 $\theta = 30^\circ$ ，箔条旋转的角频率为 $\Omega = 4\pi$ rad/s，旋转角速度风速 $v_w = (10, 0, 0)$ m/s。下面分别考察 2 种情况下单根箔条的回波信号特性：箔条仅作旋转运动和箔条不仅作旋转运动且在风力作用下平动。为简化特征分析，本文仅采用单根箔条的动态回波信号，并采集了雷达照射时间 2 s 内的单根箔条回波信号支持其微动特征的数据检验。根据 3.1 节中的数据获取流程，获得了单根箔条在以上 2 种情况下的箔条目标微多普勒效应仿真结果，如图 8~图 9 所示。为便于观测，仿真中回波信号的多普勒频率加入了时延。

可以看出，箔条的旋转微运动会导致回波频谱展宽，展宽大小与仿真中设置的多普勒频率 f_d 中第 2 项 $2f_c/c[d(R_c r_c)/dt]^T n$ 相一致。而风力所引起的箔条平动则会导致回波信号频谱的搬移，但并不影响频谱宽度，搬移大小与理论计算结果 $f_d = 2f_c v_w/c$ 相对应；此外，本文将箔条视为一个单一散射点，对应于图 8~图 9 中的正弦曲线，可以看出单根箔条的动态回波信号对其微运动特性的反映程度良好，箔条回波信号的微多普勒信号时频分析结果与理论值是十分吻合的，曲线的周期与设置的理论旋转周期 $T = 2\pi/\|\omega\|$ 也相一致。因此，通过分析箔条回波的微多普勒频率变化规律，提取其变化周期，可以有效地获得箔条目标的旋转周期、径向速度等信息。

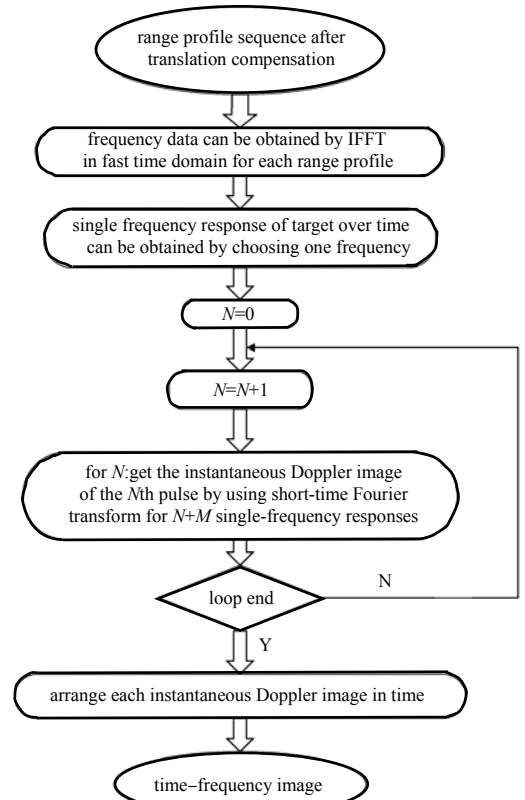


Fig.7 Flow chart of time frequency sequence algorithm
图 7 时频图序列算法流程图

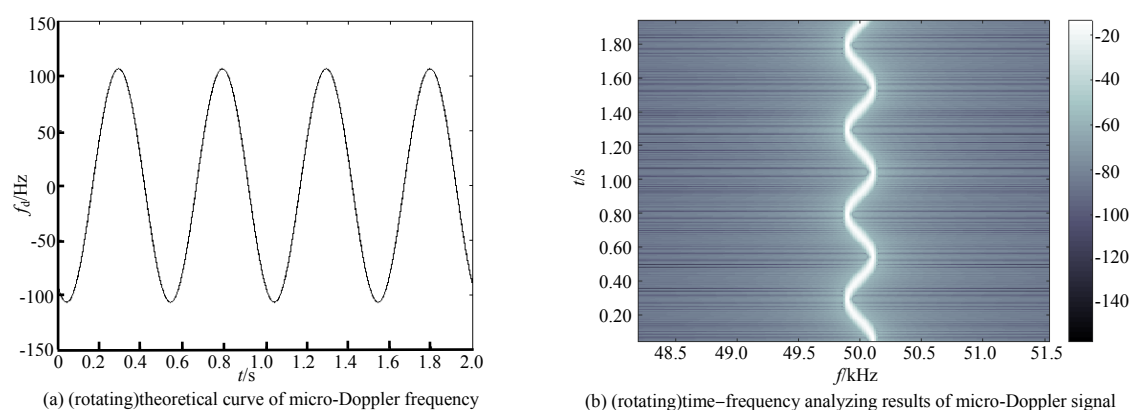


Fig.8 Simulation results of rotating chaff's micro-Doppler effect

图 8 箔条旋转的微多普勒效应仿真结果

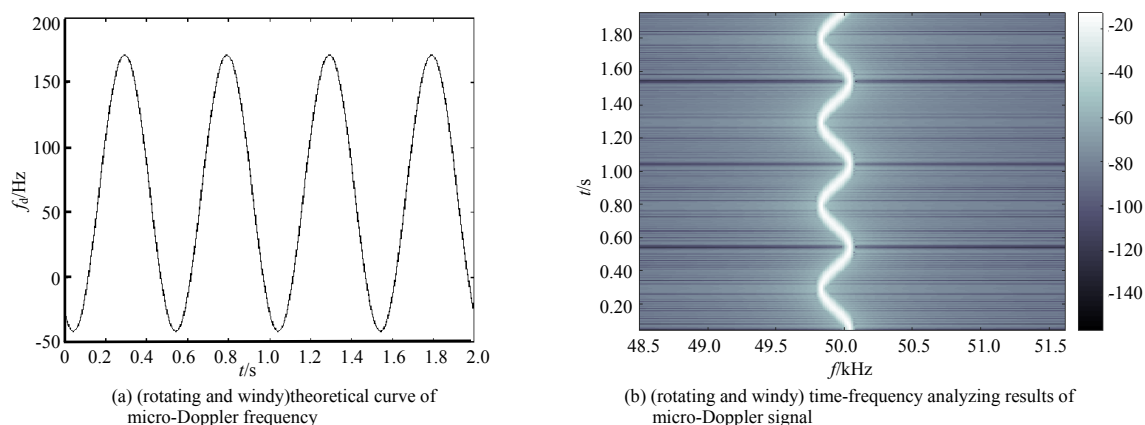


Fig.9 Simulation results of rotating chaff's micro-Doppler effect (under the influence of wind)

图 9 箔条旋转且受到风力影响下的微多普勒效应仿真结果

4 结论

本文建立了单根箔条的微运动学模型，仿真了箔条目标的回波信号，并利用时频分析方法，获得了箔条目标回波的时频图，分析了单根箔条干扰回波信号的时频特性，得到微动环境下单根箔条的微动变化规律。后续工作中，将通过单根箔条回波信号相干叠加的方式，模拟箔条云回波信号，并对箔条云回波信号在时间-距离-多普勒域的微动特性开展进一步研究。

参考文献：

- [1] 李云鹏,崔伟,骆鲁秦. 箔条干扰及机载多普勒雷达箔条干扰回波特性分析研究[J]. 雷达与对抗, 2012,32(3):42-44. (LI Yunpeng,CUI Wei,LUO Luqin. The analysis of chaff jamming and its echo characteristics for airborne PD radars[J]. Radar & ECM, 2012,32(3):42-44.)
- [2] 侯国超,刘蜀. 舰船箔条干扰过程仿真建模研究[J]. 舰船电子对抗, 2017,40(2):69-72. (HOU Guochao,LIU Shu. Research into the simulation on and modeling of ship chaff jamming process[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2017,40(2):69-72.)
- [3] 孙迎丰,李亚飞,王新政. 雷达信号仿真中箔条干扰回波模型研究[J]. 指挥控制与仿真, 2014,36(4):60-64. (SUN Yingfeng,LI Yafei,WANG Xinzhen. Research on chaff echo model in radar signal simulation[J]. Command Control & Simulation, 2014,36(4):60-64.)
- [4] 李尚生,付哲泉,李炜杰,等. 箔条干扰回波信号频域特性研究[J]. 现代防御技术, 2016,44(4):37-42. (LI Shangsheng, FU Zhequan,LI Weijie,et al. Frequency characteristics of chaff echo signal[J]. Modern Defence Technology, 2016,44(4):37-42.)
- [5] 陈宇凯,李金梁,李永祯,等. 机载箔条弹雷达回波的建模与仿真[J]. 航天电子对抗, 2011,27(4):24-30. (CHEN Yukai, LI Jinliang,LI Yongzhen,et al. Modeling and simulation of echo of aircraft target with chaff[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2011,27(4):24-30.)

(下转第 49 页)