

# 摆动锥体目标微多普勒分析和提取

高红卫<sup>1</sup>, 谢良贵<sup>2</sup>, 文树梁<sup>1</sup>, 匡勇<sup>1</sup>

(1. 中国航天科工集团二院二十三所, 北京 100854; 2. 中国航天科工集团二院, 北京 100854)

**摘要:** 本文研究锥体目标的摆动特性及其微多普勒特征. 在引入微多普勒相关概念和信号模型的基础上, 建立了锥体目标的摆动模型, 并对其微多普勒分别用代数法和矩阵法进行了理论推导. 通过仿真, 采用时频分析方法从雷达回波中成功提取出摆动的微多普勒特征, 且与计算结果完全一致, 从而验证了摆动模型及其微多普勒理论推导的正确性. 同时, 研究了速度和加速度对微多普勒的影响以及微多普勒对雷达照射时间和重返时间的要求, 所得结论对微多普勒的提取具有一定的参考价值.

**关键词:** 锥体目标; 摆动; 微多普勒

**中图分类号:** TN959. 1+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)12-2497-06

## Analysis and Extraction of Micro-Doppler Induced by Cone-Shaped Target's Wobbling

GAO Hongwei<sup>1</sup>, XIE Lianggui<sup>2</sup>, WEN Shuliang<sup>1</sup>, KUANG Yong<sup>1</sup>

(1. No. 23 Institute of the Second Academy, CASIC, Beijing 100854, China; 2. The Second Academy of CASIC, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The wobble performance of cone-shaped target with its micro-Doppler signature is researched in this paper. After the interrelated concepts and signal model of micro-Doppler are introduced, the wobble model of cone-shaped target is built, and the theoretical formula of its micro-Doppler is derived separately with the algebra and matrix methods. By the simulation, the micro-Doppler modulation induced by wobble is extracted successfully from the radar echo with time-frequency analysis method, which agrees well with the computing result, and suggests that the wobble model of cone-shaped target and the mathematical derivation of its micro-Doppler theoretical formula are valid. Besides, the influence of velocity and acceleration on micro-Doppler is researched as well as the request of micro-Doppler on the radar return time and illuminating time, and the research results are valuable for the extraction of micro-Doppler.

**Key words:** cone-shaped target; wobble; micro-Doppler

### 1 引言

近来, 目标微动特性逐渐成为研究热点. 微动即微运动, Victor Chen 最早给出微动的概念<sup>[1]</sup>, 指目标在整体平动的同时, 目标或其上部件所伴有的机械振动或旋转, 如直升机的旋翼、振动的引擎等; 庄钊文等人<sup>[2]</sup>将微动引申为目标或其部件除了质心运动以外的振动、转动等非均匀的微小运动, 如桥梁的振动、天线的转动. 在导弹防御系统中, 弹道导弹弹头自旋定向时, 容易受到扰动(如释放诱饵时的扰动)而产生进动和章动; 而锥形重诱饵(也称为假弹头)由于没有姿态控制系统, 再入时会处于摇摆状态. 弹头的进动和章动以及诱饵的摇摆都是典型的微动<sup>[3~6]</sup>. 微动会对雷达回波产生调制, 即雷达回波附带有这些微动信息, 若加以利用则可用于识别. 文献[7, 8]研究了锥体目标进动时 RCS 随时间的变化, 引入微 RCS 的概念, 提取进动周期和章动角, 进而得到惯量比作为特征, 用于识别弹头和诱饵. 文献[9]研究了

弹头章动的极化散射特性并估计其章动频率, 以交叉极化分量之和与共极化分量之差的比值作为特征量用于识别.

微多普勒是研究微动的一种新途径, 它为雷达目标识别提供了新的思路. 美国海军实验室的 Victor Chen 首先将微多普勒概念<sup>[10]</sup>引入微波雷达, 并对点散射体的振动和刚体目标的旋转所产生的微多普勒进行了微动建模、理论推导和仿真计算<sup>[11, 12]</sup>, 给出了四种单一微动(振动、旋转、翻转和锥旋)的微多普勒时频特征, 并从一些雷达实验数据中如直升机的旋翼、步行者前后摇摆的手臂、旋转的天线、地面振动的角反射器、SAR 图像中的旋转结构和汽车振动的引擎等, 成功提取出相应的微多普勒时频特征. 文献[13, 14]研究了雷达目标微动分辨, 基于微多普勒和微多普勒率的傅里叶变换实现目标的微转动和微平动分辨. 文献[15, 16]研究了基于微多普勒特征的目标分类, 实现了对振动、旋转、翻转和锥旋四种不同微动的分类和识别. 文献[17]利用微多普勒的频

谱特征对固定翼和直升机进行了识别研究,取得了较好的效果.

弹头的进动和章动与诱饵的摆动是不同的微动,因而将有不同的微多普勒特征,从而将可用来识别真假目标.本文基于此,对锥体目标的摆动特性进行建模、分析和研究,提取相应的微多普勒特征,以为反导系统中的真假目标识别提供一些依据.

### 2 微多普勒相关概念

目标相对于雷达存在径向运动(质心平动),则雷达回波载频将会发生频移,这就是常见的多普勒现象,产生的频移量就是多普勒频率;若目标相对于雷达径向运动的同时,目标或其上的部件还伴有微动(如摆动、振动、旋转、翻转、锥旋、进动和章动等),则会对雷达回波产生调制,在目标多普勒频率上产生边带,这种调制就称为微多普勒现象,这些边带频率称为微多普勒频率.简而言之,平动产生多普勒,微动产生微多普勒,如图1所示.

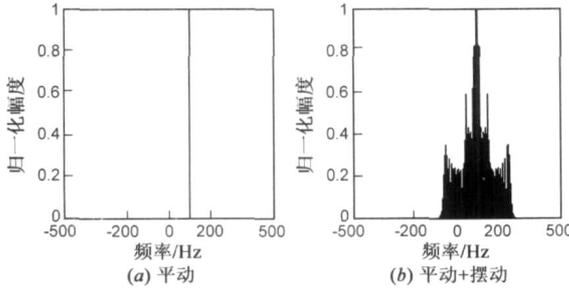


图1 雷达回波的多普勒频谱

若目标具有相对平稳的径向运动(速度或加速度近似为常数),则目标的微多普勒频率是照射时间的函数,因此要分析和研究微运动调制而产生的微多普勒,就需要采用时频分析方法,将一维时间信号映射到时频二维,来表示信号频率成分随时间的变化.最常用的线性时频分析方法就是短时傅里叶变换(STFT).对于信号  $x(t)$ ,其短时傅里叶变换为<sup>[18]</sup>

$$\text{STFT}_x(t, \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) g(\tau - t) e^{-j\Omega\tau} d\tau \quad (1)$$

其中  $g(\tau)$  是时间窗,即短时傅里叶变换就是加窄时间窗进行滑动的傅里叶变换,其时频分辨率由所加窗及其长度所决定,且受不确定原理支配.

微多普勒被认为是目标的一种“唯一”雷达特征,“唯一”是指不同的微运动会使雷达回波产生不同的调制,从而产生不同的微多普勒.如果把时频面上的微多普勒整体上看作是微运动在时频二维平面上的运动像,那么正如不同的目标具有不同的距离-横向距离二维 SAR 像一样,不同的微运动具有不同的时频二维运动像.因此,微多普勒可用于识别具有微动差异的目标.

### 3 微多普勒信号模型

由上面可知,微多普勒频率是时间的函数,是微多

普勒信号的瞬时频率,而瞬时频率是信号相位对时间的导数,因此,进行时频分析的信号应是一个复信号.在时频分析中,经常要用到解析信号<sup>[18]</sup>的概念,解析信号是一个复信号.对于一个实信号  $s(t)$ ,其解析信号为

$$z(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (2)$$

其中  $z(t)$  的实部是原实信号  $s(t)$ ,虚部是实信号  $s(t)$  的 Hilbert 变换

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

解析信号  $z(t)$  频谱的负部分为零,正部分是信号  $s(t)$  频谱正部分的两倍.基于这一核心思想,建立解析信号所必须做的工作就是略去负频率项,用 2 乘展开式中的正频率项.如对复信号  $e^{j\omega t}$ ,其解析信号为

$$A[e^{j\omega t}] = \begin{cases} 0 & \omega < 0 \\ 2e^{j\omega t} & \omega > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $A[\cdot]$  表示信号的解析信号.

解析信号的负频谱为零,而微多普勒频率随时间变化,有正有负,若采用解析信号,则会丢失负频率信息,从而无法提取完整的微多普勒信息,因此不能采用解析信号模型,要采用下面介绍的正交信号模型,即采用雷达中的正交化处理方式.

设雷达发射信号为

$$S_t(t) = u(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (5)$$

其中  $f_0$  为载频,  $u(t)$  为调制函数

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left[\frac{t - nT}{\tau}\right] \quad (6)$$

式中,  $\text{rect}$  表示矩形函数,  $T$  为脉冲重复周期,  $\tau$  为脉冲宽带.对距离  $R_r = R_0 - Vt$  为处的目标回波为

$$S_r(t) = u(t - t_r) \cos(2\pi f_0(t - t_r)) \quad (7)$$

其中  $t_r = 2R/c$  为回波时延,令  $u(t - t_r) = a(t)$ ,  $\phi(t) = -2\pi f_0 t_r$  则回波  $S_r(t)$  可改写为

$$S_r(t) = a(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi(t)) \quad (8)$$

则正交信号模型为

$$\begin{aligned} S(t) &= a(t) e^{j\phi(t)} = S_I(t) + jS_Q(t) \\ &= a(t) \cos \phi(t) + ja(t) \sin \phi(t) \end{aligned} \quad (9)$$

这个信号可以通过正交双通道获得,如图2所示.正交信号模型能提供信号完整的频率信息,把相位函数对时间进行一阶求导,就可以得到信号的瞬时频率.

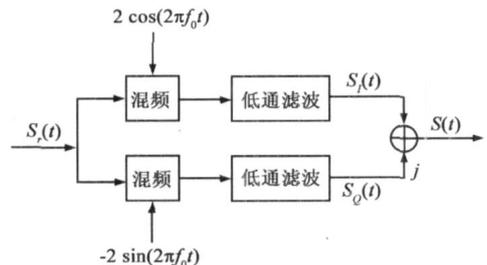


图2 正交信号模型

### 4 摆动及其微多普勒

锥体目标的摆动模型如图 3 所示. 锥体目标在本地坐标系  $(x, y, z)$  中沿  $Oz$  放置 ( $Oz$  是其对称轴), 坐标原点  $O$  为其质心. 给定方向矢量  $\vec{O}C$ , 它与锥形目标的对称轴  $\vec{Oz}$  的交点为  $O'$ , 参考坐标系  $(X, Y, Z)$  以  $O'$  为坐标原点, 且与雷达坐标系  $(U, V, W)$  平行. 锥体目标以  $O'$  点为中心在  $\vec{O}C$  与  $\vec{O}z$  所确定的平面  $zO'C$  内摆动, 摆动角为  $\theta = \theta(t) = \theta_s \sin \omega_s t$ , 其中  $\theta_s$  为摆动幅度,  $f_s$  为摆动频率.

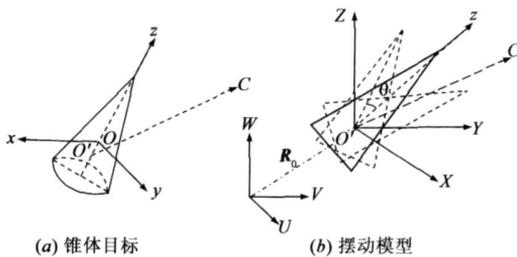


图3 锥体目标摆动模型

设坐标原点  $O'$  在雷达坐标系中的坐标矢量为  $R_0 = (U_0, V_0, W_0)^T$ , 在本地坐标系中的位置为  $r_c = (0, 0, z_0)^T$ .  $P$  为锥体目标上的一个散射点, 在本地坐标系和参考坐标系中的初始位置矢量分别为  $\vec{O}P = r_{p0} = (x_{p0}, y_{p0}, z_{p0})^T$  和  $\vec{O}P = P_0 = R_{init}(r_p - r_c) = (X_{p0}, Y_{p0}, Z_{p0})^T$ , 其中  $R_{init}$  为表征锥体目标初始姿态的 Euler 旋转矩阵.  $P$  点在参考坐标系中  $t$  时刻摆动  $\theta$  角后的位置矢量为  $\vec{O}P' = P_t = (X_p, Y_p, Z_p)^T$ .  $\vec{O}C = (A_1, B_1, C_1)$  是参考坐标系  $(X, Y, Z)$  下的单位矢量.

设锥体目标的平动速度为  $V$ , 则  $P$  点在雷达坐标系中的瞬时位置  $R_t$  可以表示为

$$R_t = R_0 + Vt + P_t \quad (10)$$

令  $r(t) = \|R_0 + Vt + P_t\|$ , 则点散射体的雷达回波基带信号为

$$S(t) = \rho \exp \left\{ 2j\mathcal{F}_c \frac{2r(t)}{c} \right\} \quad (11)$$

其中,  $\exp$  表示以  $e$  为底的指数函数,  $\rho$  为回波强度,  $c$  为光速,  $f_c$  为载频. 从而雷达回波相位为

$$\phi(t) = 2\mathcal{F}_c \frac{2r(t)}{c} \quad (12)$$

则多普勒频率

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{2r(t)} \frac{dr^2(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} \left[ V + \frac{dP_t}{dt} \right]^T n = \frac{2}{\lambda} [V]^T n + \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{dP_t}{dt} \right]^T n \quad (13)$$

其中,  $n = (R_0 + Vt + P_t) / \|R_0 + Vt + P_t\|$ . 当  $\|R_0\| \gg \|Vt + P_t\|$  时,  $n \approx R_0 / \|R_0\|$ , 为雷达视线方向(LOS

即径向(radial)), 从而有

$$f_d = \frac{2}{\lambda} [V]^T n_{radial} + \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{dP_t}{dt} \right]^T_{radial} \quad (14)$$

因此, 微多普勒频率为

$$f_{mD} = \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{dP_t}{dt} \right]^T_{radial} \quad (15)$$

可以看到, 只要能求出瞬时位置矢量  $P_t$ , 则就能求出摆动的微多普勒频率.

#### 4.1 代数法

设平面  $zO'C$  的单位法线矢量为  $n_0$ , 则

$$n_0 = \vec{O}C \times \vec{O}z / \|\vec{O}C \times \vec{O}z\| = (a, b, c)^T \quad (16)$$

设  $\vec{O}P$  在  $n_0$  方向的投影为  $P_v$ , 则

$$P_v = (\vec{O}P \cdot n_0) n_0 = (A, B, C)^T \quad (17)$$

设  $\vec{O}P$  在平面  $zO'C$  的投影为  $P_h$ ,

$$P_h = P_0 - P_v \quad (18)$$

同理设  $\vec{O}P$  在  $n_0$  方向的投影为  $P'_v$ , 在平面  $zO'C$  的投影为  $P'_h$ , 则  $P'_h = P_t - P'_v$ .

$\vec{O}P$  摆动角  $\theta$  后的位置矢量  $\vec{O}P'$ , 就是  $\vec{O}P$  绕  $n_0$  旋转  $\theta$  角, 根据  $\vec{O}P$  与  $\vec{O}P'$  等模,  $\vec{O}P$  的投影  $P_v$  与  $\vec{O}P'$  的投影  $P'_v$  相等, 以及  $\vec{O}P$  的投影  $P_h$  和  $\vec{O}P'$  的投影  $P'_h$  与  $\vec{O}C$  之间的角度关系, 可以得到三个方程联立的方程组:

$$\begin{cases} X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2 = X_{p0}^2 + Y_{p0}^2 + Z_{p0}^2 \\ aX_p^2 + bY_p^2 + cZ_p^2 = aX_{p0}^2 + bY_{p0}^2 + cZ_{p0}^2 \\ A_1(X_p - A) + B_1(Y_p - B) + C_1(Z_p - C) = L \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $L = \|P_h\| \cos(\theta_0 \pm \theta)$ ,  $\theta_0$  为  $P_h$  与  $\vec{O}C$  之间的夹角. 这是一个三元二次方程组, 会有两组解. 取两组解矢量与原矢量  $\vec{O}P$  之间夹角较小的那个, 因为摆动角不会很大. 求出矢量  $P_t = (X_p, Y_p, Z_p)^T$ , 就可以得到瞬时距离  $r(t)$ , 从而可利用式(11)进行仿真. 但是不能按式(15)进行计算, 因为代数法求得的矢量  $P_t$  是数值的, 不是解析的. 下面的矩阵法可以得到矢量  $P_t$  的解析式, 从而既可以进行计算, 也可以进行仿真.

#### 4.2 矩阵法

$P_0$  到  $P_t$  的变换可以用一个矩阵来表示

$$P_t = (X_p, Y_p, Z_p)^T = T_s P_0 \quad (20)$$

其中  $T_s$  是一个  $3 \times 3$  的变换矩阵.

设锥体目标的对称轴在本地坐标系中的初始单位方向矢量为  $A_0 = (0, 0, 1)^T$ , 则锥体目标的对称轴在参考坐标系中的初始单位方向矢量为  $\vec{O}z = R_{init}(A_0 - r_c)$ . 令  $x' = \vec{O}C$ , 是单位方向矢量,  $z' = \vec{O}C \times \vec{O}z$ ,  $y' = z' \times x'$ , 则  $x', y'$  和  $z'$  彼此相互垂直, 交于点  $O'$ , 且满足右手

法则. 将  $y'$  和  $z'$  分别归一化, 则  $\hat{x} = x'/\|y'\|$ ,  $\hat{y} = y'/\|y'\|$ ,  $\hat{z} = z'/\|z'\|$ , 则  $\hat{x}, \hat{y}$  和  $\hat{z}$  构成一新的正交坐标系  $(x', y', z')$ , 如图 4 所示.

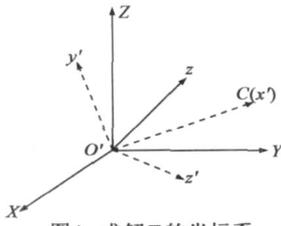


图4 求解  $T_s$  的坐标系

设参考坐标系  $(X, Y, Z)$  的三个单位方向矢量为  $\hat{i}, \hat{j}$  和  $\hat{k}$ , 则有

$$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) = (\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})A_T \quad (21)$$

即  $A_T$  为  $R^3$  空间中两组基  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$  和  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  之间得过渡矩阵, 且  $A_T$  为正交矩阵. 又因为  $(X, Y, Z)$  为自然坐标系, 即  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$  为单位阵, 故

$$A_T = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}) \quad (22)$$

设  $P$  点在新坐标系  $(x', y', z')$  中的初始位矢为  $P'_0 = (X'_{P_0} \ Y'_{P_0} \ Z'_{P_0})^T$ , 则根据基坐标变换公式可得

$$(X'_{P_0} \ Y'_{P_0} \ Z'_{P_0})^T = A_T^{-1}(X_{P_0} \ Y_{P_0} \ Z_{P_0})^T \quad (23)$$

将矢量  $P'_0$  绕  $z'$  轴旋转一角度  $\theta$ , 则得散射点  $P$  在新坐标系  $(x', y', z')$  中的瞬时位矢

$$P_{t0} = (X'_P \ Y'_P \ Z'_P)^T = B_T P'_0 \quad (24)$$

其中  $B_T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 为绕  $z'$  转  $\theta$  角的旋转矩阵.  $P$  点在坐标系  $(X, Y, Z)$  的瞬时位矢为

$$P_t = A_T P_{t0} = A_T B_T P'_0 = A_T B_T A_T^{-1} P_0 \quad (25)$$

$$\text{从而} \quad T_s = A_T B_T A_T^{-1} = A_T B_T A_T^T \quad (26)$$

因  $A_T$  为常数矩阵, 故  $T_s$  导数中关键是  $B_T$  的导数, 而

$$\begin{aligned} \frac{dB_T}{dt} &= B'_T = \theta' \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ &= \theta_s \omega_s \cos \omega_s t \begin{bmatrix} -\sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (27)$$

从而  $T_s$  的导数为

$$\frac{dT_s}{dt} = T'_s = A_T B'_T A_T^T \quad (28)$$

则根据式(15)可得摆动的微多普勒

$$\begin{aligned} f_{mD} &= \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{dP_t}{dt} \right]_{\text{radial}} = \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{d(T_s P_0)}{dt} \right]_{\text{radial}} = \frac{2}{\lambda} \left[ \frac{dT_s}{dt} T_0 \right]_{\text{radial}} \\ &= \frac{2}{\lambda} [(A_T B'_T A_T^T) P_0]_{\text{radial}} \end{aligned} \quad (29)$$

### 5 仿真研究

设雷达工作在  $C$  波段, 载频  $f_c = 5\text{GHz}$ , 脉冲重复频率  $\text{PRF} = 800\text{Hz}$ . 锥体目标高  $1.5\text{m}$ , 半径  $0.5\text{m}$ ,  $O'$  在雷达坐标系中的坐标为  $U_0 = 1000\text{m}$ ,  $V_0 = 3000\text{m}$ ,  $W_0 = 5000\text{m}$ ,

在本地坐标系中的位置为  $z_0 = -0.3\text{m}$ .  $\vec{O'C}$  的方向角为  $\alpha_c = 60^\circ$ ,  $\beta_c = 45^\circ$ . 在锥体目标上取三个散射点  $P_0, P_1$  及  $P_2$ , 在目标坐标系中的位矢为 (单位:  $\text{m}$ ):  $\vec{OP}_0 = (0, 0, 1)$ ,  $\vec{OP}_1 = (0.3, 0.4, -4.5)$ ,  $\vec{OP}_2 = (-0.3, -0.4, -0.5)$ . 锥体目标的初始位置由初始旋转矩阵  $R_{\text{init}}$  确定, 而  $R_{\text{init}}$  由三个 Euler 角  $(\alpha, \beta, \gamma)$  确定

$$R_{\text{init}} = R_{z-\alpha} R_{x-\beta} R_{z-\gamma} \quad (30)$$

$R_{z-\alpha}, R_{x-\beta}$  和  $R_{z-\gamma}$  分别表示绕  $Z$  轴旋转  $\alpha$  角, 绕  $x$  轴旋转  $\beta$  角, 再绕  $Z$  轴旋转  $\gamma$  角的旋转矩阵, 这里取  $(\alpha, \beta, \gamma) = (30^\circ, 30^\circ, 45^\circ)$ . 设锥体目标摆动频率  $f_s = 2\text{Hz}$ , 摆动角  $\theta$  的幅度为  $\theta_s = 20^\circ$ .

#### 5.1 锥体摆动的微多普勒

设锥体目标平动速度为  $V = 0$ , 对回波基带信号(见式(11), 取  $\rho = 1$ )采用短时傅里叶变换(SIFT)仿真提取摆动的微多普勒, 其结果如图 5 所示. 由此可以看到: 采用矩阵法和代数法提取摆动微多普勒的结果基本一样, 但代数法提取时存在开根号的运算, 精度没有矩阵法高, 且会对弱微动散射点的提取存在一些误差; 同时, 代数法得不到微多普勒的解析表达式, 因而不能用来进行理论计算. 所以, 相对而言, 矩阵法是比较好的方法.

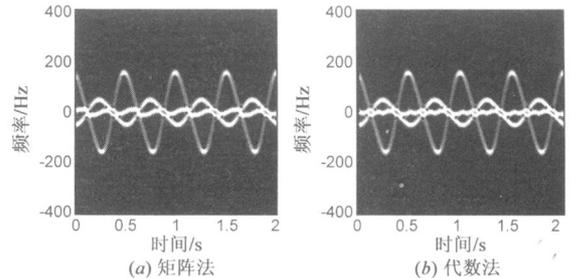


图5 矩阵法和代数法提取摆动的微多普勒

图 6 是摆动的微多普勒计算结果和仿真结果, 可以看到两者完全一致, 从而验证了微多普勒理论推导的正确性. 同时可以看到, 锥顶散射点摆动产生的微多普勒明显比锥底两散射点摆动产生的微多普勒大, 这是符合直观感觉和实际情况的, 因为锥摆的中心是靠后的, 这样虽然摆动角都一样, 但是摆动的幅度是不一样的, 锥顶的摆动幅度比锥底的摆动幅度大, 因而产生的微多普勒大小就不同, 因为微多普勒的大小与摆动的幅度、摆

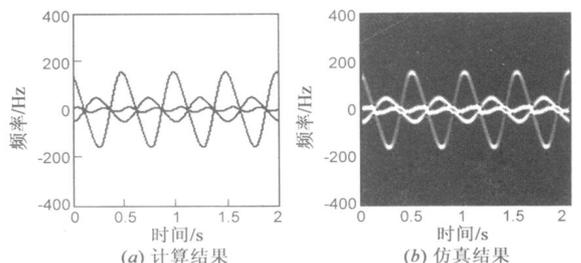


图6 锥体目标摆动的微多普勒

动频率和摆动角的大小都有关。

由图 6 看到: 摆动的微多普勒具有周期性, 周期为 0.5s, 与设定的摆动频率 2Hz 吻合; 摆动调制产生的多普勒频率范围约为  $(-170\text{Hz}, 170\text{Hz})$ , 即微多普勒调制带宽为 340Hz; 摆动的微多普勒在时频面上的变化规律近似为正弦振荡, 它相当于摆动的时频二维运动像。不同的微动将有不同的微多普勒, 其微动周期、调制带宽和变化规律会有所差异, 因而可作为特征用于识别。

## 5.2 速度和加速度的影响

由式(14)可知, 目标运动(包括平动和微动)所产生的总多普勒由两部分组成, 第一项表示平动产生的多普勒(可称为体多普勒, 简称为多普勒), 第二项表示微动产生的多普勒(微多普勒), 即平动产生多普勒, 微动产生微多普勒。平动产生的多普勒会对微多普勒产生影响, 如图 7 和图 8 所示。

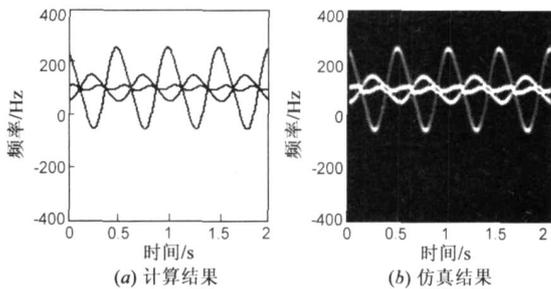


图7 速度( $v=3\text{m/s}$ )对微多普勒的影响

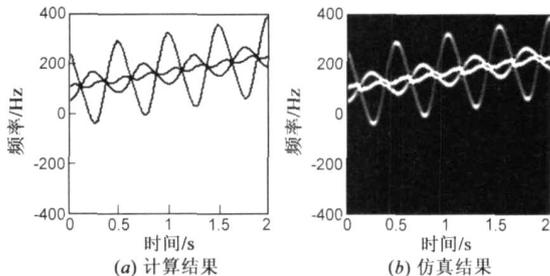


图8 加速度( $a=2\text{m/s}^2$ )对微多普勒的影响

将图 7 与图 6 比较, 可以看到: 平动速度的存在, 使微多普勒在时频面上沿频率轴方向发生平移, 平移量就是速度对应的多普勒频率, 且某些速度可能导致微多普勒发生折叠, 使微多普勒分布在频率轴方向的两端。再将图 8 与图 7 比较, 可以看到: 若目标同时存在平动加速度, 则在速度使微多普勒沿频率轴方向发生平移的同时, 加速度使微多普勒在时频面上发生倾斜, 倾斜方向为多普勒频率随时间线性变化的方向, 而沿此方向观察, 微多普勒的特性(如周期、带宽和变化规律)并没有发生任何改变。简言之, 平动速度和加速度对微多普勒的影响分别表现为使微多普勒平移和倾斜。

对微多普勒而言, 平动速度和加速度的影响虽然并不本质改变微多普勒的特性, 但却干扰微多普勒特征

(如周期、带宽和变化规律)的提取, 如速度的存在可能使微多普勒产生折叠分散, 不利于微多普勒调制带宽的提取; 而加速度的存在会给微多普勒周期的提取带来麻烦(周期的时间轴投影变小), 且加速度的存在会展宽目标的多普勒频率范围, 在雷达重返时间一定时, 可能会造成微多普勒模糊而无法提取(将在下面的一节中分析)。因此, 目标平动速度和加速度对微多普勒提取并没有好处(即没有用), 反而影响和干扰微多普勒特征的提取, 所以应将速度和加速度补偿掉。

## 5.3 对雷达照射时间和重返时间的要求

由于微多普勒的提取是跨周期利用多个回波进行的, 所以对目标的单次照射时间无特殊要求, 总观察时间满足提取微动周期的要求即可, 而对重返时间有严格要求。对于长时间连续照射的脉冲雷达而言, 重返时间就是脉冲重复周期, 在微多普勒提取时相当于采样周期, 故根据采样定理, 它必须小于等于目标微多普勒带宽的倒数所对应的时间, 即脉冲重复频率必须大于或等于微多普勒带宽, 否则出现欠采样, 将无法提取完整的微多普勒信息。

图 7 中的微多普勒带宽为 340Hz 左右, 图 8 中的多普勒带宽加上加速度的调制带宽约为 450Hz 左右, 将雷达的脉冲重复频率(相当于采样频率)从 800Hz 降为 300Hz, 则微多普勒在频谱和时频谱均发生模糊, 如图 9 所示, 其中(a)和(b)对应于图 7, (c)和(d)对应于图 8。图(c)和(d)比(a)和(b)模糊严重, 是因为加速度展宽了多普勒带宽, 增加了导致模糊的机会。模糊将导致信息丢失, 因此应选择短的重返时间, 以保证高的采样率。

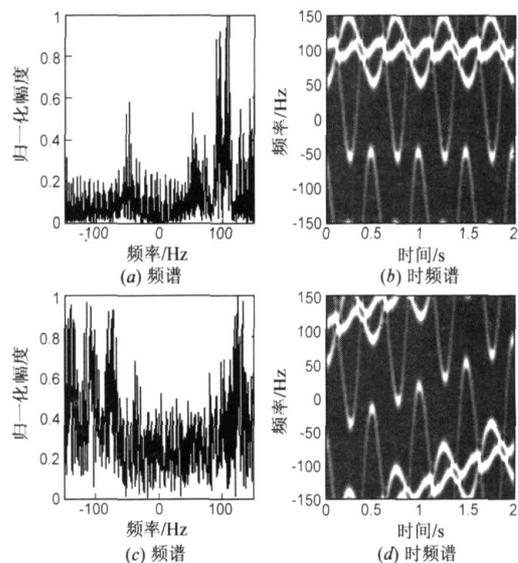


图9 重返时间过长导致微多普勒模糊

## 6 结束语

本文从微多普勒的角度研究了锥体目标的摆动特性, 介绍了微多普勒的相关概念和正交信号模型, 建立

了摆动的微动模型,并分别采用代数法和矩阵法推导了微多普勒的理论公式,且通过仿真计算,验证了本文提出的摆动模型和理论推导的正确性。同时指出速度、加速度将干扰微多普勒的提取,应补偿掉;以及为保证微多普勒信息完整,不发生欠采样而导致的模糊,雷达的重返时间要小于目标微多普勒带宽的倒数所对应的时间。下一步将研究散射点的遮挡效应以及散射强度的变化对微多普勒的影响,以修正和完善微多普勒的散射点模型。

#### 参考文献:

- [1] Chen V C. Analysis of radar micro Doppler signature with time frequency transforms [ A ]. Proceedings of the Tenth IEEE Workshop on Statistical and Array Processing [ C ]. Pocono Manor, PA USA: IEEE, Aug 2000. 463– 466.
- [2] 庄钊文,刘永祥,黎湘. 目标微动特性研究进展 [ J ]. 电子学报, 2007, 35(3) : 520– 525.  
Zhuang Zhao wen, Liu Yong xiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro motion [ J ]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3) : 520– 525. ( in Chinese )
- [3] Camp W W, Mayhan J T, O' Donnell R M. Wideband radar for ballistic missile defense and range Doppler imaging of satellites [ J ]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2) : 267– 280.
- [4] Kevin M Cuomo, Jean E Piou, Joseph T Mayhan. Ultra wide band coherent processing [ J ]. Lincoln Laboratory Journal, 1997, 10(2) : 203– 222.
- [5] 陈建文,倪晋麟. 弹道导弹的雷达目标识别技术 [ A ]. 第八届全国雷达学术年会论文集 [ C ]. 中国,合肥: 38 所情报中心, 2002. 185– 188.
- [6] 黄培康,闫锦. 弹道导弹 ( BM ) 对抗中的识别与反识别技术 [ J ]. 航天电子对抗, 2005, 21(3) : 1– 3.
- [7] 陈行勇,黎湘,等. 微进动弹道导弹目标雷达特征提取 [ J ]. 电子与信息学报, 2006, 28(4) : 643– 646.  
Chen Hang yong, Li Xiang, et al. Radar feature extraction of micro precession ballistic missile warhead [ J ]. Journal of Electronic & Information Technology, 2006, 28(4) : 643– 646. ( in Chinese )
- [8] 金文彬,刘永祥,等. 锥体目标空间进动特性分析及其参数提取 [ J ]. 宇航学报, 2004, 25(4) : 408– 410.  
Jin Wen bin, Liu Yong xiang, et al. Character analyzing of spatial precession for cone and its parameter extracting [ J ]. Journal of Astronautics, 2004, 25(4) : 408– 410. ( in Chinese )
- [9] 王涛,周颖,等. 雷达目标的章动特性与章动频率估计 [ J ]. 自然科学进展, 2006, 16(3) : 344– 350.
- [10] Victor Chen, Ling H. Time Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [ M ]. Boston: Artech House, 2002. 173– 193.
- [11] Chen V C. Micro Doppler effect of micro motion dynamics: a review [ A ]. Proceedings of SPIE on Independent Component Analysis, Wavelet, and Neural Networks [ C ]. Orlando, USA: SPIE Press, 2003. 240– 249.
- [12] Chen V C. Micro Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [ J ]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2006, 42(1) : 2– 21.
- [13] 陈建文,李士国. 基于目标运动分辨技术提取导弹目标运动特征 [ J ]. 现代雷达, 2003, 25(6) : 5– 8.  
Chen Jian wen, Li Shi guo. Missile motion feature extraction based target motion resolution [ J ]. Modern Radar, 2003, 25(6) : 5– 8. ( in Chinese )
- [14] 陈行勇,刘永祥,等. 雷达目标微动分辨 [ J ]. 系统工程与电子技术, 2007, 35(3) : 361– 364.  
Chen Hang yong, Liu Yong xiang, et al. Motion resolution of radar targets [ J ]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 35(3) : 361– 364. ( in Chinese )
- [15] Jiabin Lei. Target classification based on micro Doppler signatures [ A ]. IEEE International Radar Conference [ C ]. Arlington, Virginia, USA: IEEE, May 2005. 179– 183.
- [16] 张琳,盛卫星,等. 基于微多普勒效应的雷达目标识别算法 [ J ]. 现代雷达, 2007, 29(12) : 35– 39.  
Zhang Lin, Sheng Wei xing, et al. Radar target recognition algorithm based on micro Doppler effect [ J ]. Modern Radar, 2007, 29(12) : 35– 39. ( in Chinese )
- [17] 陈行勇,黎湘,等. 基于旋翼微动雷达特征的空中目标识别 [ J ]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(3) : 372– 375.  
Chen Hang yong, Li Xiang, et al. Identification of air target based on the micro motion radar signatures of blades [ J ]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(3) : 372– 375. ( in Chinese )
- [18] L. 科恩著,白居宪译. 时-频分析: 理论与应用 [ M ]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998. 22– 28.

#### 作者简介:



高红卫 男, 1980 年 5 月出生于陕西西安, 分别于 2003 年和 2006 年获西安电子科技大学电磁场与微波技术专业学士和硕士学位。现为中国航天二院二十三所博士生, 主要研究方向为雷达目标识别技术。  
E Mail: hwg\_ycc@126.com



谢良贵 男, 1964 年 3 月出生于江西, 1992 年毕业于电子科技大学, 获电磁场与微波技术专业博士学位, 研究员, 博士生导师。中国航天二院院长, 总装备部雷达探测技术专业组副组长, 中国宇航协会理事、无人飞行器分会理事长。曾获国家科技进步三等奖一项, 部级科技进步一等奖两项, 三等奖一项。在国内外公开刊物及学术会议上发表论文 30 余篇, 主要研究方向为雷达系统设计与目标识别。