

## 基于多目标跟踪的空间锥体目标微多普勒频率提取方法

邵长宇 杜兰\* 李飞 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文在等效散射中心模型下,分析了光滑空间锥体目标进动和章动时回波的微多普勒频率与运动参数的关系。针对目标微多普勒频率的复杂形式,该文提出一种在时频分布(TFD)的基础上,利用多目标跟踪(MTT)技术分离空间锥体目标各等效散射中心微多普勒频率变化曲线的方法。该方法首先应用经典的短时傅里叶变换得到回波的 TFD,然后将目标在 TFD 上的时频曲线看作机动目标的航迹,利用 MTT 技术跟踪 TFD 上的时频曲线,从而达到提取目标各等效散射中心微多普勒频率的目的。实验中利用电磁仿真数据验证了提出算法的有效性。

**关键词:** 多目标跟踪; 微动; 微多普勒频率; 等效散射中心模型

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)12-2972-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00656

## Micro-Doppler Extraction from Space Cone Target Based on Multiple Target Tracking

Shao Chang-yu Du Lan Li Fei Liu Hong-wei

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the equivalent scatter center model, the relationship between the micro-Doppler frequencies and the motion parameters of the space cone target with precession or nutation is analyzed. Due to the complicated form of the micro-Doppler frequency mentioned above, an approach to separate the micro-Doppler frequency curve of each equivalent scatter center in the Time Frequency Distribution (TFD) of target echo is proposed in this paper. In this method, classical Short-Time Fourier Transformer (STFT) is first used to obtain the TFD of the target echo; then the Multiple Target Tracking (MTT) algorithm is applied to track the micro-Doppler frequency curves in the TFD, which are assumed to be the tracks of maneuvering targets. Thus the micro-Doppler frequencies of each equivalent scatter center are extracted via the method. In the simulation experiments, the performance of the proposed method is evaluated via the electromagnetic computation simulated data.

**Key words:** Multiple Target Tracking (MTT); Micro-motion; Micro-Doppler frequency; Equivalent scatter center model

### 1 引言

雷达中的多普勒现象是指目标的雷达回波频谱发生平移,这通常是由目标相对雷达的径向平动引起的。若目标或目标部件存在微运动,如震动或转动,则会引起雷达回波的频率调制,这种现象称为微多普勒效应<sup>[1]</sup>。微多普勒效应首先在相干激光雷达中被观测到<sup>[2]</sup>,文献[3]将其引入到微波雷达中,并研究了震动和转动等点目标引起的单频信号回波微多普勒效应的数学原理。微多普勒特征被看作是具

有微动目标的特有特征,自 2000 年将其引入到微波雷达以来,基于微多普勒的研究发展十分迅速。现在目标的微多普勒特征已经成为车辆、飞机、弹道导弹等目标分类、识别的重要特征<sup>[4-6]</sup>。

当前,目标窄带回波的微多普勒频率特性分析主要是基于由时频分析得到的时频分布(TFD),文献[6]比较了几种常见时频分析方法的变换结果及性能差异。目标等效散射中心的微动反映到 TFD 上为时频曲线,将时频曲线从 TFD 中分离出来,有利于目标的微动参数估计和特征提取,但通常多个等效散射中心的时频曲线间相互交叉,增加了时频曲线提取的难度。文献[7]提出了一种基于 TFD 估计目标微动周期的方法,但该方法估计的微动频率精度不高,且会产生模糊。文献[8]利用 Hough 变换和扩展 Hough 变换来估计目标的微动参数,该方法需要知

2012-05-29 收到, 2012-09-21 改回

国家自然科学基金(61271024, 61201292, 61201283), 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-09-0630), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)和中央高校基本科研业务费专项资金联合资助课题

\*通信作者: 杜兰 dulan@mail.xidian.edu.cn

道目标的微动参数方程，而复杂运动目标等效散射中心的参数方程通常不易得到，因此，该方法目前主要用来提取简单微动变化(如对应时频图正弦变化的简单旋转运动)的微多普勒频率。文献[9]提出了利用 Viterbi 方法提取时频曲线，该方法利用了频点的位置和能量信息，可以有效地分离目标的微动频率，但该方法没有利用目标的运动状态信息，如果时频图在时频曲线交叉处不够清晰，容易产生错误。

空间锥体目标由于散射中心数目较少，为提取和分离目标的微多普勒频率提供了可能。本文利用等效散射中心模型，首先分析了空间锥体目标进动和章动时回波微多普勒频率的特点，并利用电磁仿真数据验证了模型的正确性；由于微多普勒频率的形式较复杂，本文提出通过经典的短时傅里叶变换(STFT)获得 TFD 后，将 TFD 上散射中心的时频曲线看作目标的运动轨迹，然后运用多目标跟踪(MTT)技术，获得目标各等效散射中心的微多普勒频率变化曲线。我们将提出的方法称为基于时频分布的多目标跟踪时频曲线分离方法(TFD-MTT)。该方法的特点是不需要知道目标等效散射中心的微动参数方程，而是利用简单运动模型进行近似，且该算法运算量小、实时性高。最后本文利用电磁仿真数据验证算法的有效性。

## 2 锥体目标微多普勒分析

建立目标微动模型如图 1 所示。设目标坐标系  $oxyz$ ,  $o$  为圆顶锥体底面圆心。雷达视线  $No$  在目标坐标系  $oxyz$  中的方位角和俯仰角分别为  $(\alpha, \beta)$ ；若目标自旋，则目标绕锥体对称轴  $oA$  以角速度  $\omega_s$  旋转；若目标进动，则目标自旋的同时也绕  $oM$  轴以角速度  $\omega_c$  做锥旋运动，锥旋轴  $oM$  在  $yoz$  平面，与自旋轴的夹角为  $\theta$ ；若目标章动，则目标做进动的同时，锥旋角随时间绕自旋轴周期摆动，摆动幅度为  $\phi$ ，摆动频率为  $f_v$ 。在目标运动过程中建立参考坐标系  $ox'y'z'$ ,  $z'$  为锥体对称轴，参考坐标系  $x'$  轴垂直于雷达视线与锥体对称轴所构成的平面，即

$$\mathbf{R}_c(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_c t) & -\cos\theta \sin(\omega_c t) & \sin\theta \sin(\omega_c t) \\ \cos\theta \sin(\omega_c t) & 1 - \cos^2\theta [1 - \cos(\omega_c t)] & \sin\theta \cos\theta [1 - \cos(\omega_c t)] \\ -\sin\theta \sin(\omega_c t) & \sin\theta \cos\theta [1 - \cos(\omega_c t)] & 1 - \sin^2\theta [1 - \cos(\omega_c t)] \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 2.2 章动模型

章动是在进动的基础上，又合成了一种摆动，即章动是自旋、锥旋和摆动 3 种运动的合成，是一种更为复杂的微动。在  $t$  时刻，锥体对称轴的单位向量为

$$\mathbf{p}_{\text{int}}(t) = \mathbf{R}_v(t)\mathbf{R}_c(t)\mathbf{R}_s(t)\mathbf{p}_0 \quad (4)$$

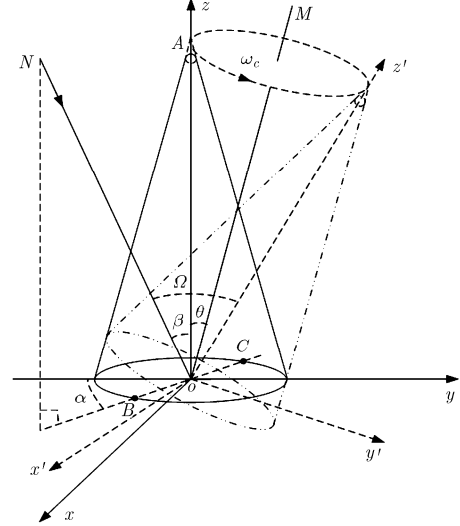


图 1 目标微动模型

$Noz'$  平面， $y'$  轴由右手定则确定。

由于目标为光滑圆顶锥体，因此采用等效散射中心模型。由文献[10]知，光滑锥体只有锥顶  $A$  和由雷达视线与锥体对称轴所构成的平面  $NoA$  与锥体边缘的交点  $B$  和  $C$  3 个等效散射中心。为推导简便，不妨假设雷达视线的方位角  $\alpha = 0^\circ$ ，则雷达视线方向  $\overrightarrow{oN}$  在坐标系  $oxyz$  的单位矢量为： $\mathbf{n} = [\sin\beta \quad -\cos\beta]^\text{T}$ 。

### 2.1 进动模型

进动是由自旋加锥旋而形成的<sup>[11]</sup>，初始时刻锥体对称轴方向的单位向量为  $\mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 1]^\text{T}$ ，在任意时刻  $t$ ，锥体对称轴方向的单位向量为

$$\mathbf{p}_{\text{pre}}(t) = \mathbf{R}_c(t)\mathbf{R}_s(t)\mathbf{p}_0 \quad (1)$$

其中  $\mathbf{R}_s(t)$  为自旋旋转矩阵， $\mathbf{R}_c(t)$  为锥旋旋转矩阵，由文献[12]，可知

$$\mathbf{R}_s(t) = \begin{bmatrix} \cos(\omega_s t) & -\sin(\omega_s t) & 0 \\ \sin(\omega_s t) & \cos(\omega_s t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{R}_v(t)$  为摆动矩阵，假设锥体摆动幅度为  $\phi$ ，摆动频率为  $f_v$ ，则摆动角为  $\gamma(t) = \phi \sin(2\pi f_v t)$ ，从而有

$$\mathbf{R}_v(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma(t)) & -\sin(\gamma(t)) \\ 0 & -\sin(\gamma(t)) & \cos(\gamma(t)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 回波微多普勒频率

在  $t$  时刻, 锥体轴线与雷达视线夹角的余弦为

$$\Omega(t) = \cos(\mathbf{p}(t), \mathbf{n}) = \mathbf{p}^T(t) \mathbf{n} \quad (6)$$

其中, 若锥体进动则  $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_{\text{pre}}(t)$ , 若章动则  $\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}_{\text{nut}}(t)$ 。假设  $\mathbf{p}(t)$  与  $\mathbf{n}$  的夹角小于  $90^\circ$ , 则在参考坐标系  $ox'y'z'$  中, 雷达视线为  $\mathbf{n}' = [0 \ (1 - \Omega^2(t))^{1/2} \ -\Omega(t)]^T$ 。设初始时刻, 散射中心在参考坐标系的坐标为  $\mathbf{r}'_0 = [0 \ y_0 \ z_0]^T$ , 则其到  $o$  点的距离在  $No$  方向的投影为

$$r(t) = \mathbf{n}'^T \mathbf{r}'_0 \quad (7)$$

从而由目标进动或章动引起的微多普勒频率为

$$f_{\text{micro}}(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} \quad (8)$$

由式(6)~式(8)可知, 目标进动或章动时, 目标等效散射中心的微多普勒频率是一个复杂的变化形式, 并不都是简单的正弦变化(目标进动时锥顶的微多普勒频率为正弦变化)。由于  $\mathbf{p}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$ , 因此  $\mathbf{R}_s(t) \mathbf{p}_0 = \mathbf{p}_0$ , 即式(1)和式(4)可以分别写成

$$\mathbf{p}_{\text{pre}}(t) = \mathbf{R}_c(t) \mathbf{p}_0 \quad (9)$$

$$\mathbf{p}_{\text{nut}}(t) = \mathbf{R}_v(t) \mathbf{R}_c(t) \mathbf{p}_0 \quad (10)$$

结合式(6)~式(10)可知, 光滑锥体的自旋对目标回波没有影响。

利用电磁仿真数据验证模型的正确性, 目标形状如图1所示, 圆顶锥体高 0.97 m, 圆顶半径为 0.01 m, 底面半径为 0.25 m。发射信号为单频信号, 信号载频 10 GHz, 重频 1 kHz; 雷达方位角  $\alpha = 0^\circ$ , 俯仰角  $\beta = 45^\circ$ 。假设回波无噪声, 目标章动, 进动角  $\theta$  为  $6^\circ$ , 摆动角为  $6^\circ$ , 锥旋频率为 6 Hz, 摆动频率为 2 Hz 时的回波 TFD 如图2所示。

从图2可以看出, 光滑锥体在俯仰角  $\beta$  为  $45^\circ$  下由于遮挡只有两个等效散射中心, 分别为锥顶  $A$  和距雷达较近的锥底边缘  $B$ 。利用等效散射中心模型仿真时假设两个散射中心具有相同的散射强度。图2(a)是利用等效散射中心模型仿真得到的 TFD,

图2(b)是电磁仿真数据得到的 TFD。比较等效散射中心模型得到的 TFD 和电磁仿真数据得到的 TFD, 图2(a)和图2(b)具有大致相同的时频分布, 可以验证等效散射中心模型的正确性, 即光滑锥体目标的回波可以仅由若干等效散射中心的回波等效, 且等效散射中心的个数较少, 因此我们可以提取这些等效散射中心的微动频率, 这有利于光滑空间锥体目标的微动参数估计和目标识别。

### 3 多目标跟踪技术

本文利用雷达中比较成熟的 MTT 技术进行 TFD 中的时频曲线跟踪。将 TFD 中每一时刻各等效散射中心的微多普勒频率看作目标的点迹, 则 TFD 中各等效散射中心的微多普勒曲线可以看成目标的航迹。MTT 技术能够对多个目标进行跟踪并得到多目标的航迹, 将其应用到 TFD 中, 同时跟踪多等效散射中心的时频曲线, 从而达到提取目标各散射中心多普勒频率的目的。MTT 技术主要包括点迹形成、航迹起始、数据关联、滤波算法、航迹消除等内容。本节将简单介绍点迹形成处理<sup>[13]</sup>, Kalman 滤波及运动模型<sup>[14]</sup>和数据关联算法<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 点迹形成处理

获取好的点迹是后面应用卡尔曼滤波(KF)以及数据关联的基础。本文在 TFD 的基础上, 对每一时刻的频谱做恒虚警(CFAR), 得到一系列的频率点。但由于 TFD 的分辨精度问题, 通常一个散射中心会检测到多个连续频点, 这时有必要对所得到的点进行点迹凝聚处理。点迹凝聚是对每一时间的各个散射中心的频点数据求质心, 将质心作为估计的瞬时多普勒频率值。对同一散射中心产生的、在频率上连续的点迹计算质心, 计算质心公式为

$$f_d = \frac{\sum_{i=1}^n f_i E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (11)$$

其中  $n$  为一个散射中心获得点迹的个数,  $f_i$  和  $E_i$  分别为第  $i$  个点迹的频点和幅值。

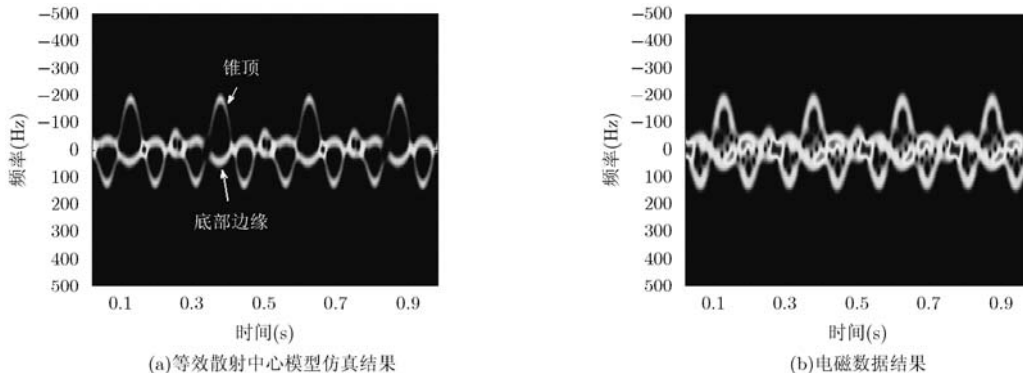


图2 目标回波 TFD

### 3.2 Kalman 滤波及运动模型

获得等效散射中心微多普勒频率在 TFD 上的点迹后, 为了将各个等效散射中心关联起来, 需要进行对等效散射中心当前状态的估计, 过去状态的平滑以及未来状态的预测。本文采用传统的 KF 和二阶常速(CV)模型对获得的点迹进行平滑和预测。KF 是一种递推最优线性最小均方估计算法, 其分为两个阶段, 第 1 阶段是预测阶段, 在这一阶段, 基于先前的测量预测下一时刻的系统状态, 第 2 阶段是基于测量的更新, 具体可参考文献[14]。

在目标跟踪中, 目标的运动模型是一个基本要素。由于微动目标散射中心的运动模型不易建立, 我们用 CV 模型进行近似。本文中并没有采用常加速度模型或其它高阶模型, 这是因为高阶模型的变化量较多, 而 TFD 的精度不够高, 通常在两条时频曲线相交处会有很多点迹, 如果采用高阶模型, 数据关联算法比较容易产生错误关联。CV 模型如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (12)$$

其中  $x$ ,  $\dot{x}$ ,  $\ddot{x}$  分别为散射中心的瞬时多普勒频率在 TFD 上的位置、速度和加速度分量;  $w(t)$  是均值为零, 方差为  $\sigma^2$  的高斯白噪声。

### 3.3 数据关联算法

数据关联算法是 MTT 的核心, 利用该算法, 可以将 TFD 中相交的时频曲线分别提取出来。本文以最近邻关联(NNDA)算法为例, NNDA 算法是简单有效的数据关联方法。在利用 NNDA 算法时, 首先要设置一个跟踪门, 跟踪门的中心位于目标的预测位置, 大小应保证一定的概率接收正确的频点。以落入跟踪门内的测量作为候选频点, 即

$$g(k) = [\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1}]^T \mathbf{S}_k^{-1} [\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_{k/k-1}] \leq \varepsilon \quad (13)$$

式中  $\varepsilon > 0$  表示跟踪门限。若只有一个观测频点落入该门限内, 则该频点直接用于更新 KF 和进行 Kalman 平滑; 若落入跟踪门限内的观测频点大于一个, 此时要统计距离最小的候选频点作为散射中心的瞬时微多普勒频率, 即使新息加权范数  $g(k)$  最小的测量频点用于 KF 的跟踪和平滑。NNDA 算法的优点是算法简单, 实时性强, 在工程中被广泛应用。

## 4 微动频率分离及 TFD-MTT 算法

微动频率提取和分离的基本思想是首先通过 STFT, 得到回波的 TFD, 然后在 TFD 的基础上, 利用 MTT 技术进行多条微多普勒曲线跟踪, 从而将各条微多普勒曲线分别提取和分离出来。

在 TFD 的基础上应用 MTT 进行微多普勒曲线

跟踪时, 首先需要得到起始的点迹, 起始点迹在 MTT 中是通过航迹起始算法得到。本文实验中使用等效散射中心模型, 当雷达视线  $\overrightarrow{oN}$  与锥体对称轴  $\overrightarrow{oA}$  夹角在锥体半锥角与  $90^\circ$  之间, 由于遮挡, 目标回波只有两个等效散射中心(A 和 B), 且等效散射中心的时频曲线在 TFD 上是连续的, 即可认为 TFD 上第 1 个时刻得到的频点数包含所有等效散射中心的微多普勒频率, 即 TFD 上的时频曲线数量。因此, 只需要对第 1 个时频窗长数据的频谱做 CFAR 和点迹凝聚处理, 就可以得到起始点迹和散射中心数量, 然后应用 TFD-MTT 算法, 算法步骤如下:

(1)初始化参数: 设置时频窗长  $m$ , 以及时频滑动步长  $n$ , 首先对前  $m$  次回波做 FFT, 然后做 CFAR 和点迹凝聚, 得到起始点迹。设定滤波器参数, 初始化运动模型参数, 回波计数器初始化  $k = m - n$ 。

(2)求回波傅里叶变换(FFT): 如果  $k = m$ , 求  $m$  次回波 FFT; 否则  $k = k + 1$ , 继续(2)。

(3)CFAR 和点迹凝聚处理: 对得到的频谱做 CFAR 处理, 对得到的点迹做点迹凝聚处理, 利用式(11)获得每个散射中心的点迹。

(4)数据关联算法进行数据关联: 应用 NNDA 算法, 利用前一时刻的预测值对当前得到的点迹进行数据关联, 将这一时刻得到的点迹分别与目标的散射中心相对应。

(5)KF 更新, Kalman 平滑: 对关联后的点迹进行 Kalman 更新, 通常得到的微多普勒曲线会有毛刺, 这时可以进行 Kalman 平滑处理, 使得到的微多普勒曲线更加平滑。

(6)利用 KF 进行一步预测: 对得到的点迹进行 KF 一步预测, 预测目标各个散射中心微多普勒频率的变化状态。

(7)  $k = k - n$ , 转(2)。

## 5 实验仿真

实验仿真参数: 目标形状如图 1 所示。发射信号为单频信号, 信号载频 10 GHz, 重频 1 kHz; 雷达方位角  $\alpha = 0^\circ$ , 俯仰角为  $\beta = 45^\circ$ , 锥体进动时进动角  $\theta$  为  $6^\circ$ , 章动时锥体在做进动同时又做摆动, 摆动角为  $6^\circ$ 。为了更接近真实情况, 利用电磁仿真数据验证提出方法 TFD-MTT 算法的正确性。

### 5.1 进动目标微动频率提取

假设目标进动, 锥旋频率为 6 Hz, 目标回波无噪声。将 TFD 做 CFAR 处理和点迹凝聚处理后, 结果如图 3(a)所示。图 3(b)给出了 Kalman 预测和关联后的结果。图 3(c)给出了 Kalman 平滑结果, 图 3(d)将平滑结果重新在 TFD 中显示, 以便进行比较。

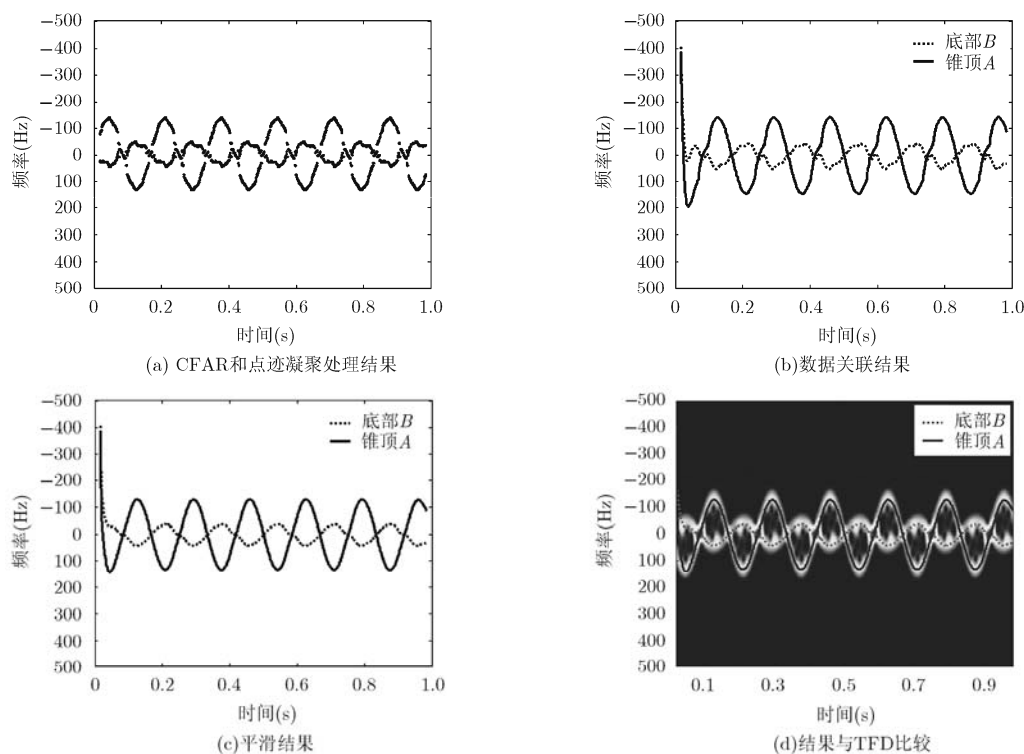


图3 进动时跟踪结果

## 5.2 目标章动微动频率提取

目标章动, 锥旋频率为 6 Hz, 摆动频率为 2 Hz, 假设回波信号无噪声, TFD 如图 2(b)所示。章动跟踪处理结果如图 4 所示, 图 4(a)给出了信号 CFAR 和点迹凝聚后的结果, 图 4(b)给出了数据关联和平滑处理后的结果。

在回波中加入白噪声, 设回波信噪比为 5 dB, 处理结果如图 5 所示。

两个实验结果表明, 在锥体进动时, 由于 TFD 的微动曲线变化较简单, 得到的频率点迹较准确, 因此跟踪的结果较好; 在锥体章动时, TFD 的微动曲线变化较复杂, 提取的频率点迹会有虚假情况(图 4(a)中在同一时刻会出现两个以上点迹), 但是利用

MTT 的方法可以有效排除虚假点迹, 同时由于章动微动曲线变化较快, 而目标运动模型的参数选取与进动时的相同, 因此峰值与实际情况相比会有些低, 特别是在变化较快的地方, 这主要是由 Kalman 平滑造成的。对于锥体进动和章动, 本文提出的 TFD-MTT 算法均可以有效地提取 TFD 中的微多普勒曲线, 将目标的各个等效散射中心的微多普勒频率分离。图 5 表明, 在目标回波信噪比为 5 dB 左右时, 虽然点迹凝聚的结果会产生较多的虚假点迹, 该方法仍能够准确地提取出目标回波等效散射中心的微多普勒频率。

## 6 结束语

本文分析了微动光滑锥体的微多普勒频率, 得

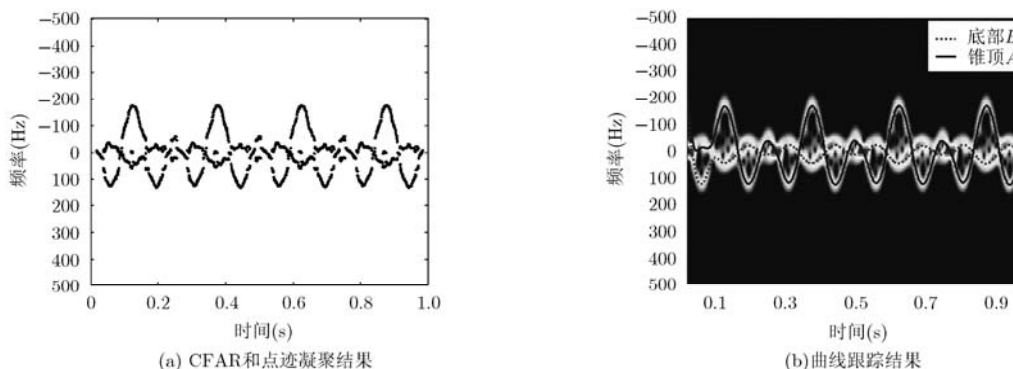


图4 章动时跟踪结果

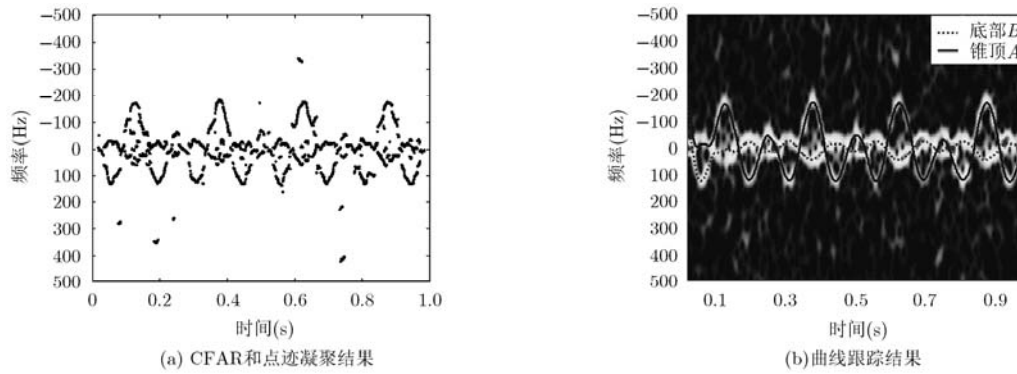


图 5 信噪比 5 dB 下章动处理结果

出光滑锥体的回波可以由较少等效散射中心的回波等效的结论,但由于等效散射中心复杂微动的微多普勒频率的变化规律不易得到,本文提出了 TFD-MTT 算法提取目标等效散射中心的微多普勒频率,该算法应用 MTT 技术,利用 CV 模型近似目标的微动,在 TFD 的基础上提取目标散射中心的微多普勒频率。实验结果表明,本文提出的 TFD-MTT 算法可以有效地提取锥体目标在进动和章动情况下等效散射中心的微多普勒频率。如何利用提取的微多普勒频率进行空间锥体目标的微动参数估计和目标识别将是下一步的研究方向。

### 参考文献

- [1] Parker K J, Lerner R M, and Huang S R. Method and apparatus for using Doppler modulation parameters for estimation of vibration amplitude[P]. U. S. Patent 5,086,775, Feb. 11, 1992.
- [2] Lovett A, Shen C, and Otaguro W. Micro Doppler: non-cooperative target classification/identification[R]. A420040, AD, Maryland, USA, Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 2004.
- [3] Chen V C, Li F Y, and Ho S S. Micro-Doppler effect in radar phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] 李彦兵, 杜兰, 刘宏伟, 等. 基于微多普勒特征的地面目标分类[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2848-2852.  
Li Yan-bing, Du Lan, Liu Hong-wei, *et al.* Ground targets classification based on micro-Doppler effect[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2848-2852.
- [5] Bell M R and Grubbs R A. JEM modeling and measurement for radar target identification[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, 29(1): 73-87.
- [6] Gao H, Xie L, Wen S, *et al.* Micro-Doppler signature extraction form ballistic target with micro-motions[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [7] 李开明, 李长栋, 李松, 等. 基于 Gabor 变换的微动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报, 2010, 11(1): 40-43.
- [8] Li Kai-ming, Li Chang-dong, Li Song, *et al.* Analysis and simulation for micro-Doppler information of micro-motion target based on Gabor transformation[J]. *Journal of Air force Engineering University*, 2010, 11(1): 40-43.
- [8] 王璐, 刘宏伟. 基于时频图的微动目标运动参数提取和特征识别的方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1812-1817.  
Wang Lu and Liu Hong-wei. Method for micro-motion target recognition and motion parameter extraction based on time-frequency analysis[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(8): 1812-1817.
- [9] Li Po, Wang D C, and Wang Lu. Separation of micro-Doppler signals based on time frequency filter and Viterbi algorithm[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2011, DOI:10.1007/S11760-011-0263-3.
- [10] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
- [11] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 229-234.
- [12] Chen V C, Li F, Ho S S, *et al.* Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 271-276.
- [13] 吴顺君, 梅晓春, 等. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 468-470.
- [14] Hartikainen J and Särkkä S. Optimal Filtering with Kalman Filters and Smoothers — A Manual for Matlab Toolbox EKF/UKF[M]. Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2008.
- 邵长宇: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为雷达空间目标识别。
- 杜兰: 女, 1980 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为统计信号处理、雷达信号处理、机器学习及其在雷达目标检测与识别方面的应用。
- 李飞: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和雷达目标识别。
- 刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 雷达信号处理国家重点实验室主任, 研究方向为雷达信号处理、MIMO 雷达、雷达目标识别、自适应信号处理、认知雷达等。