

基于时频图的微动目标运动参数提取和特征识别的方法

王璐 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: 空间运动特征是导弹目标识别所依据的主要目标特性之一。该文通过在散射中心模型下,研究了导弹微动时回波的时频变化的特性,并由此提出了一种用于估计多散射点瞬时多普勒的线性之和的新方法。对该线性和做傅里叶变化,能够有效地估计目标自旋、锥旋、进动频率,周期等运动参数。在此基础上,提出多普勒线性之和的傅里叶谱的波形熵特征可以很好地用于实际中弹头和诱饵的识别。结果表明该方法可有效地区分弹头和诱饵。

关键词: 目标识别; 微动; 时频变换; 微多普勒; 波形熵

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)08-1812-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01127

Method for Micro-motion Target Recognition and Motion Parameter Extraction Based on Time-frequency Analysis

Wang Lu Liu Hong-wei

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

Abstract: Spatial motion feature is one of main target features for missile target identification. This paper investigates micro-motion of the missile target. Time-frequency analysis is used to extract micro-Doppler signature, based on which an approach is proposed for estimating the linear sum of the micro-Dopplers of scatters. Motion parameters can be extracted by applying Fourier Transform to the sum. Then waveform entropy is presented for the missile identification. The simulation results and the recognition results validate the effectiveness of theoretical analysis.

Key words: Target recognition; Micro-motion; Time-frequency transformation; Micro-Doppler; Waveform entropy

1 引言

弹道导弹防御面临的环境和技术日益复杂,如何实现导弹自由飞行段和再入段的预警和识别,并引导我方导弹进行拦截,是弹道导弹防御的关键。雷达目标识别技术的研究对于导弹防御系统和战略、战术弹道导弹突防技术的发展均具有重要的军事意义。弹头在打击目标时为了保持自身飞行的稳定性,需要在平动飞行的同时,绕自身对称轴自旋,绕其锥旋轴锥旋,形成一种特殊的运动方式——进动。导弹这种特殊的运动方式是识别导弹目标的主要依据之一,该运动属于微动。如何有效地估计弹头运动时的运动参数,以及通过微动特征区分弹头和诱饵一直是一个研究热点和难点。美国海军实验室的Chen提出微动现象,研究了微多普勒的数学原理^[1-3]。文献[4]通过运动目标分辨技术得到目标运动信息。文献[5]利用雷达横截面回波数据估计进动参数提出质阻比识别导弹。文献[6]在单个散射点的情况下求得了单散射点的瞬时多普勒。文献[7, 8]根据微运动的不同瞬时多普勒提出特征来区分各种微

动。文献[9]根据导弹回波特性和利用倒谱的方法,在单一运动方式下可以提取弹头的运动信息。与以上文献不同的是:本文在多散射中心模型下,分别对导弹在自旋与进动时回波以及其时频变化的特性进行理论研究和分析,提出了简单有效的方法提取目标的运动参数,解决了多散射点弹头在复杂运动状态下的运动参数提取的问题。在此基础上,提出波形熵的特征用于实际中弹头和诱饵的识别。识别结果表明该方法简单有效。

2 进动锥形弹头目标的雷达回波特性分析

进动是自旋弹头特有的运动特性。弹道导弹再入段的进动属微动(micromotion)。如图1所示,侧面散射均匀的锥体目标的进动示意图,自旋轴为 Z 轴 $([0 \ 0 \ 1])$,锥旋轴 $([0 \ \sin \theta \ \cos \theta])$ 与自旋轴同在 YOZ 平面上,进动角为 θ ,设自旋角频率为 w_s ;锥旋角频率为 w_c ;雷达位于 R_0 处,雷达视线到 Z 轴夹角为 φ ,设雷达视角矢量为 \mathbf{LOS} : $r_{\mathbf{LOS}} = [0 \ \sin \varphi \ \cos \varphi]$ 。

设雷达发射单频信号: $s_t(t) = \exp(j2\pi f_c t)$ 。其中 f_c 为载频。

弹体表面上任意散射点 i 的初始位置坐标(观测

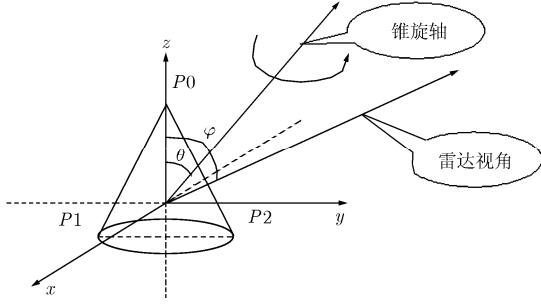


图 1 锥体弹头进动示意图

时间 $t_0 = 0$) 为 $[x \ y \ z]$ 。在观测时间 t 时刻, i 点的位置坐标为 $r_i(t) = [x_t \ y_t \ z_t]^T$ 。

$$r(t) = \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = R_c(t) \cdot R_s(t) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 自旋旋转矩阵为

$$R_s(t) = \begin{bmatrix} \cos(w_s t) & -\sin(w_s t) & 0 \\ \sin(w_s t) & \cos(w_s t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

锥旋旋转矩阵为

$$R_c(t) = \begin{bmatrix} \cos(w_c t) & -\cos \theta \sin(w_c t) & \\ \cos \theta \sin(w_c t) & \cos^2 \theta (\cos(w_c t) - 1) + 1 & \\ -\sin \theta \sin(w_c t) & \sin \theta \cos \theta (1 - \cos(w_c t)) & \\ \sin \theta \sin(w_c t) & & \\ \sin \theta \cos \theta (1 - \cos(w_c t)) & & \\ \sin^2 \theta (\cos(w_c t) - 1) + 1 & & \end{bmatrix} \quad (3)$$

散射点 i 的瞬时距离在雷达的径向上的投影为

$$\begin{aligned} r_i(t) \Big|_r = (r_i(t), r_{\text{LOS}}) &= [-\sin(\theta - \varphi) \sin(w_c t) \cos(w_s t) \\ &+ (\cos \theta (1 - \cos(w_c t)) \sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi) \sin(w_s t)] x \\ &+ [\sin(\theta - \varphi) \sin(w_c t) \sin(w_s t) + (\cos \theta (1 - \cos(w_c t)) \\ &\cdot \sin(\theta - \varphi) + \sin \varphi) \cos(w_s t)] y + [\sin \theta (1 - \cos(w_c t)) \\ &\cdot \sin(\varphi - \theta) + \cos \varphi] z \end{aligned} \quad (4)$$

散射点的瞬时多普勒频率为

$$fd_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_i(t)}{dt} = \frac{2f_c}{c} \frac{d}{dt} R_i(t) = \frac{2}{\lambda} r_i'(t) \Big|_r \quad (5)$$

其中 $\phi_i(t)$ 表示相位, c 为光速, λ 为波长, (a, b) 表示 a 和 b 的内积。

由式(5)可知: 对单个散射点的瞬时多普勒并对其做傅里叶变换, 可提出进动弹头的自旋频率, 锥旋频率, 以及进动周期。对于多散射点模型, 估计进动弹头的自旋频率、锥旋频率的问题就转化成估计各个散射点微多普勒的线性叠加的问题了。

3 进动锥形弹头目标的雷达回波时频特性分析

为方便起见, 下文中认为: $r_i(t) = (r_i(t), r_{\text{LOS}})$ 。混频后的回波信号为

$$\begin{aligned} s_r(t) &= \sum_{i=1}^M a_i \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} f_c r_i(t)\right) \\ &= \sum_{i=1}^M A_i \exp(-jK r_i(t)) \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $A_i = a_i \exp(-j2\pi f_c \tau_0)$, $K = (4\pi/c)f_c$ 。 a_i 散射点 i 的强度。

回波信号的短时傅里叶变换为

$$\begin{aligned} M(t, f) &= \int s_r(\tau) w(\tau - t) \exp(-j2\pi \tau f) d\tau \\ &= \int \sum_{i=1}^M A_i \exp(-jK r_i(\tau)) w(\tau - t) \exp(-j2\pi \tau f) d\tau \\ &= \sum_{i=1}^M \int A_i \exp(-jK r_i(\tau)) w(\tau - t) \exp(-j2\pi \tau f) d\tau \\ &= \sum_{i=1}^M M_i(t, f) \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $w(\tau) = \begin{cases} 1, & -\Delta \leq \tau \leq \Delta \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

令 $\tau - t = t_m$, 则

$$\begin{aligned} M_i(t, f) &= A_i \int_{-\Delta}^{\Delta} \exp(-jK r_i(t_m + t)) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi(t + t_m)f) dt_m \end{aligned} \quad (8)$$

由于窗函数的时间很短, 可将 $r_i(t_m + t)$ 在 t 处一阶泰勒展开为

$$r_i(t_m + t) = r_i(t) + r_i'(t)t_m = r_i(t) - (\lambda/2)fd_i(t)t_m \quad (9)$$

代入式(8)得单个散射点 i 的时频分布函数为

$$\begin{aligned} M_i(t, f) &= A_i \int_{-\Delta}^{\Delta} \exp(-jK r_i(t_m + t)) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi(t + t_m)f) dt_m \\ &= A_i \exp(-jK r_i(t)) \exp(-j2\pi t f) \\ &\quad \cdot 2\Delta \text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_i(t))) \end{aligned} \quad (10)$$

则

$$|M_i(t, f)| = 2a_i \Delta |\text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_i(t)))| \quad (11)$$

定义

$$f(t) = \frac{\int f |M(t, f)|^2 df}{\int |M(t, f)|^2 df} \quad (12)$$

可以证明在散射点个数较少的情况下 $f(t) \approx \sum_i fd_i(t)$, 可通过以下 3 个步骤证明:

步骤 1 对于单个散射点容易证明 $f(t) = fd(t)$, 证明过程略。

步骤 2 验证两个散射点时 $f(t)$ 为该两个散射

点的瞬时多普勒的线性叠加。

两个散射点时, 时频分布的模平方:

$$\begin{aligned} |M(t, f)|^2 &= |M_1(t, f) + M_2(t, f)|^2 \\ &= 4\Delta^2 [A_1^2 \text{sinc}^2(2\pi\Delta(f - fd_1(t))) \\ &\quad + A_2^2 \text{sinc}^2(2\pi\Delta(f - fd_2(t))) \\ &\quad + 2A_1A_2 \text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_1(t)))\text{sinc}(2\pi\Delta \\ &\quad \cdot (f - fd_2(t)))\cos(K(r_1(t) - r_2(t)))] \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{\int f |M(t, f)|^2 df}{\int |M(t, f)|^2 df} = \{A_1^2 Bfd_1(t) + A_2^2 Bfd_2(t) \\ &\quad + 2A_1A_2 \cos(K(r_1(t) - r_2(t))) \int f \text{sinc}(2\pi\Delta \\ &\quad \cdot (f - fd_1(t)))\text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_2(t)))df\} / \{A_1^2 B \\ &\quad + A_2^2 B + 2A_1A_2 \cos(K(r_1(t) - r_2(t))) \\ &\quad \cdot \int \text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_1(t)))\text{sinc}(2\pi\Delta(f - fd_2(t)))df\} \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $B = \int \text{sinc}^2(x)dx$ 。

对于上述推导的结果, 做如下假设: 在任意时刻, 令频率遍历, 只有当频率等于多普勒 $fd_i(t)$ 时, $\text{sinc}^2(x)$ 函数值为 1, 否则为 0。实际上这种假设是合理的, 因为 sinc 函数的副瓣相对于主瓣相当低, $\text{sinc}^2(x)$ 函数的主副瓣比将更大。同时, 技术上可以采用加窗的方法使其主副瓣比进一步加大。

基于上述假设和定义, 有两个散射点时有

$$f(t) = \frac{a_1^2 fd_1(t) + a_2^2 fd_2(t)}{a_1^2 + a_2^2} \quad (15)$$

步骤 3 基于上述假设和定义, 可推得 3 个散射点时的情况:

当 $fd_2(t) \neq fd_1(t) \neq fd_3(t)$:

$$f(t) = \frac{a_1^2 fd_1(t) + a_2^2 fd_2(t) + a_3^2 fd_3(t)}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (16)$$

当 $fd_2(t) = fd_1(t) = fd_3(t) = fd(t)$:

$$f(t) = \frac{a_1^2 fd_1(t) + a_2^2 fd_2(t) + a_3^2 fd_3(t)}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2} \quad (17)$$

而当 $fd_2(t) = fd_1(t) = fd(t) \neq fd_3(t)$: 出现交叉项 $\cos(K(r_1(t) - r_2(t)))$ 。

$$\begin{aligned} f(t) &= \{a_1^2 fd(t) + a_2^2 fd(t) + a_3^2 fd_3(t) + 2a_1a_2 \\ &\quad \cdot \cos(K(r_1(t) - r_2(t)))fd(t)\} / \{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 \\ &\quad + 2a_1a_2 \cos(K(r_1(t) - r_2(t)))\} \quad (18) \end{aligned}$$

由式(16), 式(17)可得: 某时刻, 若各个散射点的瞬时多普勒频率都不同或完全相同时, 式(12)估计的瞬时多普勒频率为各散射点瞬时多普勒频率的线性叠加; 由式(18)可得出: 当某时刻各个散射点

的瞬时多普勒频率有相同的又有不同的时, 式(12)估计的瞬时频率, 由于出现了交叉项 $\cos(K(r_1(t) - r_2(t)))$, 该交叉项点使 $f(t)$ 不再表征各散射点瞬时多普勒频率线性叠加。同上, 可以推得多散射点时的情况, 当散射点数为 1-2 个时, 估计的瞬时多普勒频率任意时刻都准确地表征各散射点瞬时多普勒频率的线性叠加。3 个或 3 个以上散射点时, 在某些时刻, 当时频图上有交叉点而非所有散射点瞬时频率的公共交点时, 式(12)估计的瞬时频率作为各散射点瞬时多普勒频率的线性叠加会有误差。而导弹这类具有稀疏散射点特性的目标, 即其弹体本身的散射点个数较少, 相对于所有的观测时间来说, 上述误差可以忽略。故式(12)求得的 $f(t)$ 做傅里叶变化, 弹头的自旋、锥旋频率处可以明显地积累出峰值来, 进而可以求得进动周期。由于处理过程中涉及两次傅里叶积累, 该方法对噪声不敏感。

4 遮挡对时频图以及上述方法估计影响

导弹运动过程中总会存在遮挡。即某一时刻, 只有那些在雷达照射区的散射点才有回波产生, 假设雷达可以看到 180° 的区域。

对于绕自身对称轴自旋的诱饵, 每一个旋转周期内, 各个散射点只有半周期处于雷达照射区内。其时频图上出现截断, 相当于调制了一个占空比为 50% 的频率为自旋频率的矩形波。其频谱则相当于未截断前的频谱与上述矩形波频谱的卷积。即截断前, 估计得到的仅为自旋频率, 截断后产生自旋频率, 自旋频率的 2 倍频, 4 倍频, 6 倍频, 8 倍频等频率分量。

对于导弹, 由于进动为自旋与锥旋的复合运动, 在不知道自旋, 锥旋频率与进动角的情况下, 无法知道某个散射点能被雷达照射到的时间的长短。遮挡对不同位置的散射点的影响规律不同。原理与自旋遮挡的相类似, 相当于未截断前的频谱与截断时相应信号的频谱的卷积。仿真表明遮挡后, 大多数情况下, 除上述频率外还有: $2 \times$ 自旋 + 锥旋, $2 \times$ (自旋 + 锥旋) 等一些频率值较小的点。

5 仿真结果

仿真参数: 雷达发射单频信号, C 波段, 重频 4 kHz, 总积累时间 4 s。进动参数: 锥旋频率 2 Hz, 自旋频率 5 Hz。自旋参数: 自旋频率 3 Hz。

5.1 3 个散射点时的仿真结果

位置分别为: P_0 : [0 0 1]; P_1 : [0 -0.5 -0.5]; P_2 : [0 0.5 -0.5]。

5.1.1 无遮挡 图 2 中 2(a), 2(c)表明: 不同微运动, 各散射点的瞬时多普勒在时频图上的分布特征是不

同的。图 2(b)为利用本文提出的方法获得 $f(t)$ 的傅里叶变化，其中正频率轴上 3 个强的分量为进动的频率：锥旋频率 2 Hz，自旋频率 5 Hz，自旋+锥旋频率：7 Hz。图 2(d) 为得到自旋的频率分量：3 Hz。仿真表明对于少数散射点，式(12)估计的 $f(t)$ 能较准确地表示多散射点的微多普勒的线性组合，对其做傅里叶变化能够准确无误地估计出导弹的各个运动参数。

5.1.2 遮挡后 图 3 中，由 3(a)，3(c)可以看出遮挡使时频图上的瞬时多普勒曲线出现断裂。图 3 (b) 得到遮挡后的进动频率分量：2 Hz，5 Hz，7 Hz，9 Hz，12 Hz，14 Hz，21 Hz，28 Hz 等。图 3 (d)得到遮挡后自旋的频率分量：3 Hz，6 Hz，12 Hz，18 Hz，24 Hz 等。图 3 表明：利用上文提出的方法估计出的进动、自旋频率时，由于遮挡的存在，增加了很多频率分量，与本文所分析的遮挡模型对所得频率点的影响完全吻合。

5.2 40 个散射点时的仿真结果，散射点强度随机取，考虑遮挡

图 4(a)–4(d)表明，很多散射点时，时频图上的交叉点(而非所有散射点瞬时频率的公共交点)迅速增多，估计得到的瞬时频率在这些点上不再表征多散射点的微多普勒的线性组合。对其做傅里叶变化，除了所关心的频率点外，其他频点上也出现了虚假峰值点(毛刺)，不过这些毛刺相比所管关心的频率点的幅度要小很多，故仍然可以通过选择最大几个频点值来确定目标运动参数。图 4(b)得到的高的频率点有 2 Hz，5 Hz，7 Hz，9 Hz，12 Hz，14 Hz，21 Hz，28 Hz 等。图 4(d)在 3 Hz，6 Hz，9 Hz 等频点出现较大峰值。当然，散射点个数很多时，毛刺的增大有可能淹没弱的真实运动频率，故需要找到比较稳健的识别特征，在不能完全估计导弹运动参数的情况下区分弹头和诱饵。

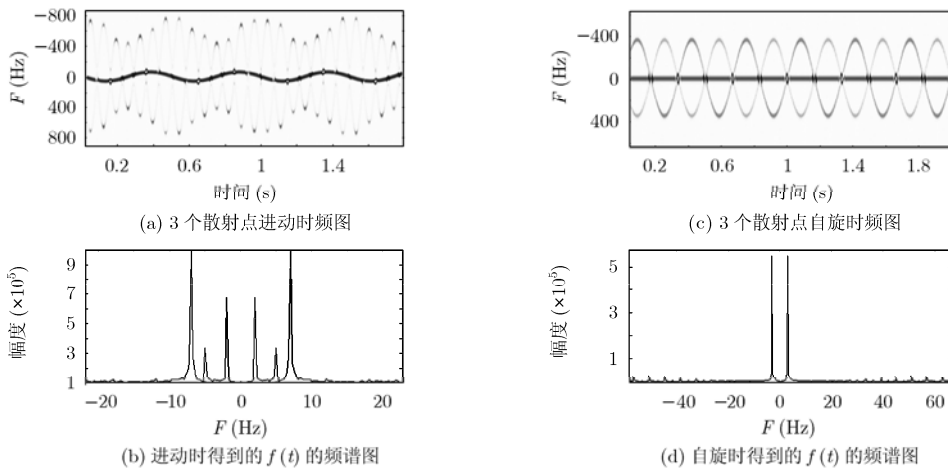


图 2 不考虑遮挡时，3 个散射点进动、自旋的时频图，以及估计的频率分量

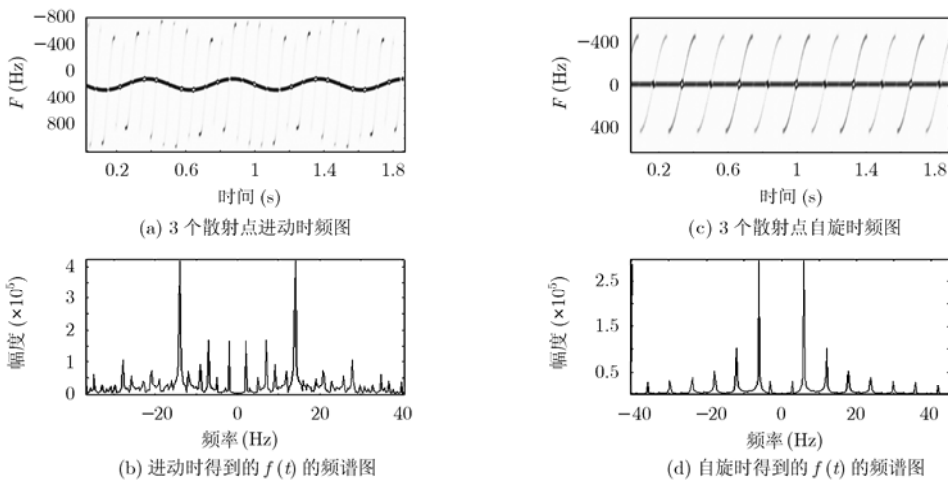


图 3 考虑遮挡时，3 个散射点进动、自旋的时频图，以及估计的频率分量

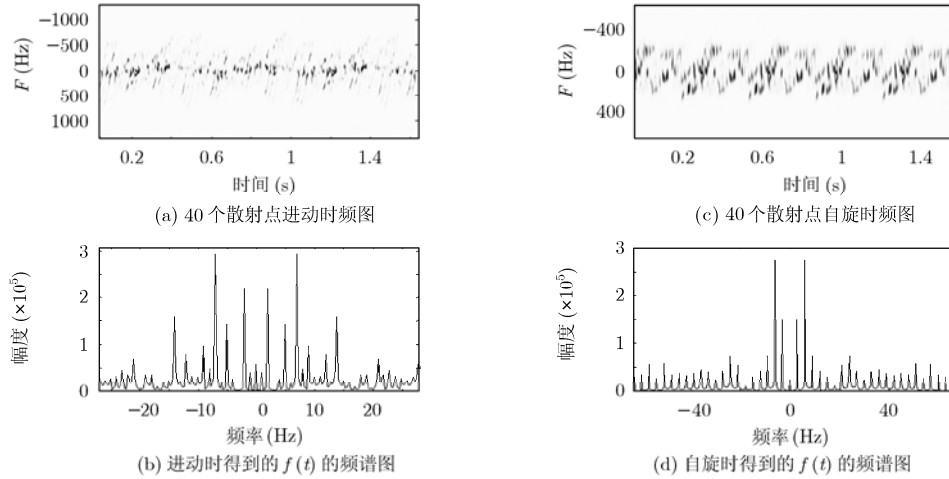


图 4 考虑遮挡时，40 个散射点进动、自旋的时频图，以及估计的频率分量

6 特征提取和识别

6.1 特征提取

对比图 2(b)与图 2(d)，图 4(b)与图 4(d)，可以很容易得到以下结论：不管在无遮挡还是有遮挡时，进动复合运动的频率分量基本上多于自旋单一运动的频率分量。故对频谱做归一化后，提取其波形熵，可作为一有效的识别特征来区分复杂运动的弹头和简单自旋或摆动的诱饵。波形熵的定义： $M = -\sum_j p_j \ln p_j$ 。 p_j 表示在所选取的频谱区间范围内，频点 j 出现的频率。

6.2 该文提出方法的流程图：

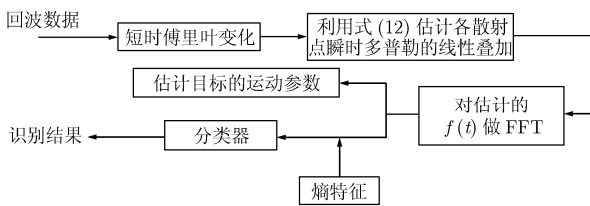


图 5 目标的运动参数估计和分类识别的流程图

6.3 导弹和诱饵的识别

训练样本：锥形弹头由强度随机选取的 40 个散射点组成，遮挡，无噪，运动状态见表 1。

表 1 锥形弹头的运动状态

	视角范围	进动轴/ 自旋轴	运动特征
Test1(导弹)	35:4:75	10-16.5	自旋: 3:1:8 Hz 锥旋: 1:1:4 Hz
Test2(诱饵)	35:4:75	0	自旋: 2:1:8 Hz

注：由于导弹的自旋频率一般大于锥旋频率，故上述运动特征中不包括锥旋频率小于等于锥旋频率的组合。

下面为不同运动状态下锥形体在不同运动状态下的频域波形熵的分布情况：

图 6 表明：进动与自旋的熵分布于不同的区间段上。基于最小错误率，可以计算得到其贝叶斯门限。识别结果见表 2。

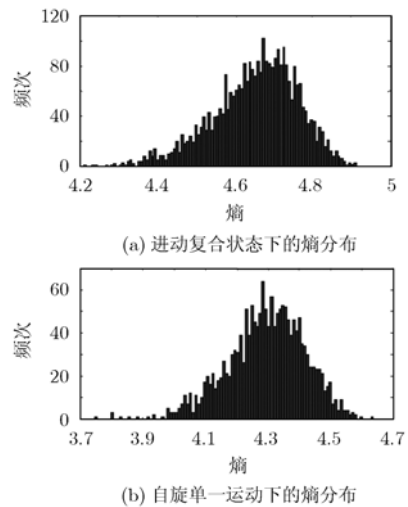


图 6 不同运动状态下锥形体在不同运动状态下的频域波形熵的分布

由表 2 可以看出，用本文提出的方法估计线性叠加的瞬时多普勒频率后，对其做傅里叶变化，得到的信号频谱图，该频谱部分区间的波形熵可以作为进动导弹和自旋诱饵的识别的特征。用该特征识别，即便在低信噪比条件下也可以得到很好的识别效果。

7 结束语

对复杂目标而言，其雷达回波是调相，微多普勒特征不仅包含了目标的运动信息也包含了目标的几何尺寸信息。对微波雷达微多普勒现象研究可以

表 2 锥体弹头、诱饵识别

	视角范围	进动轴/自旋轴	信噪比(dB)	运动特征	识别率%
Test1(导弹)	35: 4: 75	10-16.5	无噪声	自旋: 3-8 Hz 锥旋: 1-4 Hz	94.69
Test2(诱饵)	35: 4: 75	0	无噪声	自旋: 2-8 Hz	91.96
					平均识别率: 93.32
Test3(导弹)	35: 4: 75	10-16.5	12.1	自旋: 3-8 Hz 锥旋: 1-4 Hz	94.65
Test4(诱饵)	35: 4: 75	0	12.1	自旋: 2-8 Hz	90.33
					平均识别率: 92.49
Test5(导弹)	35: 4: 75	10-16.5	3	自旋: 3-8 Hz 锥旋: 1-4 Hz	96.13
Test6(诱饵)	35: 4: 75	0	3	自旋: 2-8 Hz	86.97
					平均识别率: 91.55
Test7(导弹)	35: 4: 75	10-16.5	0	自旋: 3-8 Hz 锥旋: 1-4 Hz	97.54
Test8(诱饵)	35: 4: 75	0	0	自旋: 2-8 Hz	71.39
					平均识别率: 84.465

得到复杂微动目标的运动特征提取, 以及目标的形状大小等。本文利用估计各个散射点瞬时多普勒线性叠加, 并对其做傅里叶变化, 在少数散射点时, 可精确地提取导弹的运动特征。众多散射点时, 可利用本文提出线性叠加的瞬多普勒的频谱图的波形熵作为特征, 区分进动弹头和单一自旋的诱饵。

参 考 文 献

- [1] Chen V C, Li F, and Ho S S, *et al.*. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 271-276.
- [2] Chen V C. Micro-Doppler effect of micro-motion dynamics: A review[C]. *Proceedings of SPIE on Independent Component Analyses, Wavelets, and Neural Networks*, Orlando, USA, 2003, 5102: 240-249.
- [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 Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [4] 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 and Li Shi-guo. Missile motion feature extraction based on target motion resolution[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(6): 5-8.
- [5] 陈行勇, 黎湘, 郭桂荣, 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, and Guo Gui-rong, *et al.*. Radar feature extraction of micro-precession ballistic missile warhead[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 643-646.
- [6] Sun Hui-xia and Liu zheng. Micro-Doppler feature extraction for ballistic missile warhead[C]. *IEEE International Conference on Information and Automation*. Zhangjiajie, China, 2008: 1333-1336.
- [7] Lei Jia-jin. Pattern recognition based on time-frequency distributions of radar micro-Doppler dynamics[C]. *IEEE Proceedings of the Sixth International Conference on SNPD/SAWN*, Washington DC, USA, 2005: 14-18.
- [8] 高红卫, 谢良贵, 文树梁等. 弹道导弹目标为多普勒特征提取[J]. *雷达科学与技术*, 2008, 6(2): 96-101.
Gao Hong-wei, Xie Liang-gui, and Wen Shu-liang, *et al.*. Micro-Doppler feature extraction of ballistic missile targets[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(2): 96-101.
- [9] Sun Zhao-qing, Li Bao-zhu, and Lu Yao-bing. Research on moco-motion and micro-Doppler of ballistic targets[C]. *IET International Radar Conference*, Guilin, China, 2009, 209.
王 璐: 女, 1984 年生, 硕士, 研究方向为导弹目标的检测与识别。
刘宏伟: 男, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达目标的检测与识别、雷达组网等。