

基于微多普勒特征的坦克目标参数估计与身份识别

黄 健 李 欣 黄晓涛 贺 峰
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 对坦克装甲车等地面活动目标进行分类与精确识别具有重要意义。微多普勒特征能反映目标的多种细微特征, 在目标身份识别上具有独特优势。该文讨论了坦克目标炮塔炮管这样特有结构的微多普勒特征, 基于不同种类和型号的坦克目标炮塔激励的不同微多普勒特征, 提出了一种对坦克目标参数估计和精确身份识别的方法并给出一般步骤。给出了微多普勒的理论计算和仿真时频谱, 仿真结果验证了理论分析与方法的正确性。为已有目标识别方法提供了重要辅助手段。

关键词: 身份识别; 微多普勒特征; 坦克炮塔; 炮管; 参数估计

中图分类号: TN959.1+7

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)05-1050-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00669

Micro-Doppler Features Based Parameter Estimation and Identification of Tank

Huang Jian Li Xin Huang Xiao-tao He Feng

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: It is important to classify and recognize ground moving targets such as armored cars. Micro-Doppler features have special advantages in identification due to the detailed information of target. The micro-Doppler features of turret and gun tube which possessed by tank only are discussed, a method or general process for parameter estimation and precise identification based on micro-Doppler features of different tank types is proposed, which can be valuable assistant technical approach to existing methods. Validity is verified with the identicalness of calculated and simulated time-frequency spectrum.

Key words: Identification; Micro-Doppler features; Turret; Gun tube; Parameter estimation

1 引言

战场中对目标进行尽可能精确的探测与信息提取, 对于敌我识别, 战场态势判断, 决策指挥, 具有重要意义。对地面目标的分类识别技术的研究已经较为广泛和深入。其中主要有基于高分辨一维距离像的识别方法^[1,2], 基于目标雷达图像的识别方法^[3], 但算法复杂且严重依赖于图像质量。文献[4]利用典型车辆的地面震动信号提取特征, 对轮式车履带式车进行识别。基于微多普勒技术的目标识别近年来得到广泛关注。文献[5]将语音识别中的 DTW 技术运用到微多普勒特征提取, 基于模板库实现了轮式车履带式车和行人的识别。英国 Thales 公司^[6]的基于微多普勒特征的单兵便携式监测跟踪雷达 (MSTAR), 对行人, 轮式车和履带式车 3 类目标分类的正确率超过了 80%。

目前, 对地面目标的识别多数仅能对行人, 轮式车和履带式车目标进行较为准确的分类识别, 而不

能进一步给出目标的型号等用于判断身份的特征信息。伊拉克战争中, 作为友军的美英坦克之间的误打误伤事件也表明, 需要研究对目标精确的身份识别技术。华沙大学^[7]的研究人员指出, 通过微多普勒分析可以识别车辆, 通过分析表面振动甚至可以诊断引擎状态和识别不同品牌的汽车。文献[8]基于微多普勒分析提取了车轮的几何特征, 文献[9]研究了采用微多普勒分离消除转动的坦克炮塔和炮管对 ISAR 成像影响的方法, 而未分析不同结构坦克的微多普勒特征。

未见有文献研究利用微多普勒特征, 对坦克一类目标作进一步类型或型号识别。本文主要研究不同类型的坦克在炮塔转动时炮塔和炮管产生的微多普勒特征, 基于提取的特征对目标参数进行估计, 进而对目标做出精确的身份识别。

2 微多普勒数学模型

建立针对地面目标的观测坐标系如图 1 所示。

静止的雷达位于雷达坐标系 (U, V, W) 的原点 Q 处, 目标坐标系 (x, y, z) 固定于炮塔上。为研究转动与俯仰规律, 引入参考坐标系 (X, Y, Z) , 与目标坐标

2009-05-06 收到, 2009-11-23 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0223)资助课题

通信作者: 李欣 lx_airforce@yahoo.com.cn

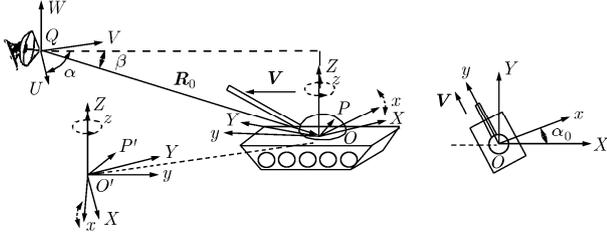


图1 雷达探测坦克目标场景示意图

系具有相同的原点 O 和平动规律, 不具有转动。初始时刻原点 O 的方位角和俯仰角分别为 α 和 β , 则雷达视线 LOS 的单位向量为 $\mathbf{n} = (\cos \alpha \cos \beta, \sin \alpha \cos \beta, \sin \beta)^T$ 。两坐标系的原点距离为 R_0 , 水平夹角为 α_0 , 目标沿自身坐标系的 y 轴方向运动, 速度为 \mathbf{V} 。初始时刻原点 O 坐标为 $R_0 \cdot \mathbf{n} = (R_0 \cos \beta \cos \alpha, R_0 \cos \beta \sin \alpha, R_0 \sin \beta)$, 考虑目标炮塔绕 Z 轴以角速度 ω_z 转动的同时, 炮管存在垂直方向角速度为 ω_j 的俯仰运动, 车体平稳运动。目标自身坐标系中散射点表示为 $\mathbf{r}_T = (x, y, z)^T$ 。设炮塔和炮管上任一散射点 P , 初始时刻位于 $\mathbf{r}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$, 则显然有

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{r}_T$$

经过 t 时间后 P 运动至 P' 位置。运动过程可分解为目标以 $\mathbf{V} = (v \cos(\alpha_0 + \pi/2), v \cos \alpha_0, 0)^T$ 的速度整体平动至 O' 处以后, 即 $\mathbf{OO}' = vt$, v 为标量速度, 炮塔和炮管再按各自的转动规律转动至 P' 处。对炮塔上的散射点旋转后的位置可表示为 $\mathbf{r} = O'P' = \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_0$, 其中

$$\text{Rot}_T(t) = \begin{pmatrix} \cos \omega_z t & -\sin \omega_z t & 0 \\ \sin \omega_z t & \cos \omega_z t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

为炮塔上的散射点的旋转矩阵。炮管上的散射点运动更加复杂, 在垂直方向的俯仰运动不是绕目标坐标系的 x 轴, 而是在 y - z 平面内绕炮管与炮塔的连接点做俯仰转动。故炮塔旋转与炮管俯仰运动同时存在时, t 时刻炮管上散射点的位置可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{r} = O'P' &= \text{Rot}_T(t) \\ &\cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 & -\sin \alpha_0 & 0 \\ \sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \left[\text{Rot}_B(t)(\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J \right] \\ &= \text{Rot}_T(t) \cdot \text{Rot}_T(\alpha_0 / \omega_z) \left[\text{Rot}_B(t)(\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J \right] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\text{Rot}_B(t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_j t & -\sin \omega_j t \\ 0 & \sin \omega_j t & \cos \omega_j t \end{pmatrix}$ 为炮管上的散

射点俯仰转动的旋转矩阵。 $\mathbf{r}_J = (x_J, y_J, z_J)^T$ 为目标坐标系中炮管与炮塔连接点的坐标。对车体主体部分, 为反映其整体运动规律用一个强散射点表示。于是, t 时刻雷达到坦克车体的距离向量可表示为

$$\mathbf{QP}' = \mathbf{QO} + \mathbf{OO}' = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t \quad (2)$$

其标量距离为

$$\begin{aligned} R_{\text{Bulk}}(t) &= \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t\| \\ &= \left[(R_0 \cos \alpha \cos \beta - vt \sin \alpha_0)^2 \right. \\ &\quad \left. + (R_0 \sin \alpha \cos \beta + vt \cos \alpha_0)^2 + (R_0 \sin \beta)^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\|\bullet\|$ 为 Euclidean 范数。

对炮塔部分的散射点有

$$\mathbf{QP}' = \mathbf{QO} + \mathbf{OO}' + \mathbf{r} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t + \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_0 \quad (4)$$

对炮管部分的散射点有

$$\begin{aligned} \mathbf{QP}' &= \mathbf{QO} + \mathbf{OO}' + \mathbf{r} = \mathbf{R}_0 + \mathbf{V} \cdot t + \text{Rot}_T(t) \\ &\quad \cdot \text{Rot}_T(\alpha_0 / \omega_z) \left[\text{Rot}_B(t)(\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J \right] \end{aligned} \quad (5)$$

为简化分析, 考虑方位角 α 和初始时刻两坐标系的夹角 α_0 均为零的情况, 不影响对微多普勒特征的分析。则 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_T$, 以上 3 部分的标量距离为

$$R_{\text{Bulk}}(t) = \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t\| \quad (6)$$

$$R_{\text{Turr}}(t) = \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t + \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_T\| \quad (7)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{Barr}}(t) &= \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t + \text{Rot}_T(t) \\ &\quad \cdot \left[\text{Rot}_B(t)(\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J \right]\| \end{aligned} \quad (8)$$

当雷达发射信号的载频为 f_c 时, 则接收到的散射点回波为

$$s(t) = \rho(x, y, z) \exp \{ j[2\pi f_c t + \varphi(t)] \} \quad (9)$$

其中 $\rho(x, y, z)$ 为与散射点在目标坐标系位置有关的反射率函数, $\varphi(t) = 4\pi R(t)/\lambda$ 为基带信号相位函数, λ 为波长。

对相位函数求导可得车体的多普勒频率

$$\begin{aligned} f_{\text{Bulk}} &= \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt} R_{\text{Bulk}}(t) \\ &= \frac{2}{\lambda} \frac{1}{2R_{\text{Bulk}}(t)} \frac{d}{dt} \left[(\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t)^T (\mathbf{R}_0 + \mathbf{v} \cdot t) \right] \\ &= \frac{2}{\lambda} \mathbf{v}^T \mathbf{n}_p \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $\mathbf{n}_p = \mathbf{QP}' / \|\mathbf{QP}'\|$ 为雷达到散射点向量 \mathbf{QP}' 的单位向量, 由于 $\|\mathbf{R}_0\| \gg \|\mathbf{V} \cdot t\|$, \mathbf{n}_p 可近似为 $\mathbf{n}_p \approx \mathbf{n} = \mathbf{R}_0 / \|\mathbf{R}_0\|$, 进而多普勒频率为

$$f_{\text{Bulk}} = \frac{2}{\lambda} v^T \mathbf{n}_p \approx \frac{2}{\lambda} v^T \mathbf{n} = \frac{2}{\lambda} [v]_{\text{radial}} \quad (11)$$

同理, 炮塔的多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{\text{Turr}} &= \frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt} R_{\text{Turr}}(t) = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{2R_{\text{Turr}}(t)} \\ &\cdot \frac{d}{dt} [(\mathbf{R}_0 + vt + \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_T)^T (\mathbf{R}_0 + vt \\ &+ \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_T)] \\ &= \frac{2}{\lambda} \left[v + \frac{d}{dt} (\text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_T) \right]^T \mathbf{n}_p \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $\text{Rot}_T(t) = \exp\{\hat{\omega}_T t\}$,

$$\hat{\omega}_T = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & 0 \\ \omega_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则进一步有

$$\begin{aligned} f_{\text{Turr}} &= \frac{2}{\lambda} \left[v + \frac{d}{dt} (e^{\hat{\omega}_T t} \mathbf{r}_T) \right]^T \mathbf{n}_p = \frac{2}{\lambda} (v + \hat{\omega}_T e^{\hat{\omega}_T t} \mathbf{r}_T)^T \mathbf{n}_p \\ &= \frac{2}{\lambda} (v + \hat{\omega}_T \mathbf{r})^T \mathbf{n}_p \approx \frac{2}{\lambda} (v + \hat{\omega}_T \times \mathbf{r})^T \mathbf{n} \end{aligned} \quad (13)$$

由于 $\|\mathbf{R}_0\| \gg \|v \cdot t + \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_T\|$, $\mathbf{n}_p \approx \mathbf{n}$, 式(13)化为

$$f_{\text{Turr}} = \frac{2}{\lambda} [v + \hat{\omega}_T \times \mathbf{r}]_{\text{radial}} \quad (14)$$

炮管的多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{\text{Barr}} &= \frac{1}{\lambda R_{\text{Barr}}(t)} \frac{d}{dt} \left\{ (\mathbf{R}_0 + v \cdot t + \text{Rot}_T(t) \cdot \right. \\ &\cdot [\text{Rot}_B(t) (\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J])^T \times (\mathbf{R}_0 + v \cdot t \\ &+ \text{Rot}_T(t) [\text{Rot}_B(t) (\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \mathbf{r}_J]) \left. \right\} \\ &= \frac{2}{\lambda} \left[v + \frac{d}{dt} \left(\text{Rot}_T(t) \cdot \text{Rot}_B(t) \right. \right. \\ &\cdot (\mathbf{r}_T - \mathbf{r}_J) + \text{Rot}_T(t) \cdot \mathbf{r}_J \left. \left. \right) \right]^T \mathbf{n}_p \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\text{Rot}_T(t) = \exp\{\hat{\omega}_T t\}$, 令 \mathbf{r}'_J 为 t 时刻炮管与炮塔的连接点在 (X, Y, Z) 坐标系的坐标, 则

$$\begin{aligned} \hat{\omega} &= \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_J \\ \omega_z & 0 & 0 \\ -\omega_J & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ f_{\text{Barr}} &= \frac{2}{\lambda} \left[v + \hat{\omega} e^{\hat{\omega} t} (\mathbf{r}_T - \mathbf{r}'_J) + \hat{\omega}_T e^{\hat{\omega}_T t} \mathbf{r}_J \right]^T \mathbf{n}_p \\ &= \frac{2}{\lambda} \left[v + \hat{\omega} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}'_J) + \hat{\omega}_T \times \mathbf{r}'_J \right]_{\text{radial}} \end{aligned} \quad (16)$$

以上分析表明, 坦克目标的多普勒频率可分为3部分讨论。车体部分作为一个整体为常数; 由旋转炮塔激励的时变多普勒分布与炮塔的形状、尺寸

和转速有关; 炮管部分的运动复杂, 产生的时变多普勒频率分布也更复杂, 与炮管的尺寸和俯仰及炮塔转速有关。

3 参数估计与精确身份识别

估计目标的各种参数提供尽可能多的信息, 用以身份识别具有重要意义。本节研究两种典型坦克目标的炮塔与炮管运动激励的微多普勒特征, 及将提取的特征用于目标的参数估计和精确身份识别的方法。

3.1 球形炮塔

考察俯仰角 $\beta = 0$ 的情况, 对远场目标和单兵战场监视雷达这点很容易满足。此时目标与雷达处于同一平面, 球形结构炮塔简化图的俯视图和侧视图如图2所示。

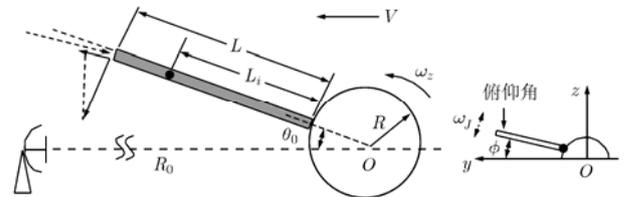


图2 雷达探测球形炮塔示意图

坦克以速度 V 向雷达前进, 炮塔以角速度 ω_z 向雷达旋转。炮塔半径为 R , 炮管长度为 L , θ_0 为初始时刻炮管与目标行进方向夹角。 L_i 为炮管上的散射点距炮管根部的距离。

由第2节的推导过程, t 时刻由于炮塔的旋转, 炮塔上的散射点与雷达的距离为

$$\begin{aligned} R_{\text{Turr}}(t) &= R_0 - Vt + r \cos(\theta + \omega_z t), \\ 0 \leq r \leq R, \quad -\pi \leq \theta \leq \pi \end{aligned} \quad (17)$$

其中 (r, θ) 为散射点在炮塔的极坐标位置。

炮管上的散射点与雷达的距离为

$$\begin{aligned} R_{\text{Barr}}(t) &= [L_i^2 + R^2 + 2RL_i \cos(\phi \sin \omega_J t) + (R_0 - Vt)^2 \\ &- 2(L_i \cos \omega_J t + R)(R_0 - Vt) \cos(\theta_0 - \omega_z t)]^{1/2} \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $0 \leq L_i \leq L$ 。由于 $R_0 - Vt \gg L_i \cos(\phi \sin \omega_J t) + R$

$$\begin{aligned} R_{\text{Barr}}(t) &\cong R_0 - Vt - (L_i \cos(\phi \sin \omega_J t) + R) \\ &\cdot \cos(\theta_0 - \omega_z t) \end{aligned} \quad (19)$$

$$f_{\text{Turr}} = 2[V + \omega_z r \sin(\theta + \omega_z t)] / \lambda \quad (20)$$

其中 $0 \leq r \leq R, -\pi \leq \theta \leq \pi$ 。第1项为目标平动引起的多普勒频率, 第2项为炮塔转动激励的微多普勒频率, 具有正弦形式的时变性。

炮管运动的多普勒频率为

$$f_{\text{Barr}} = \frac{2}{\lambda} [V - L_i \omega_j \operatorname{sgn}(\sin 2\omega_j t) |\sin(\phi \sin \omega_j t)| \cdot \cos(\theta_0 - \omega_z t) + \omega_z (L_i \cos \omega_j t + R) \sin(\theta_0 - \omega_z t)] \quad (21)$$

其中 $0 \leq L_i \leq L$, ϕ 为最大仰角, sgn 为取符号函数。后两项为炮管微动激励的微多普勒频率, 具有更加复杂的正弦形式。

3.2 多边形炮塔

多边形炮塔是另一大类主战坦克炮塔结构, 不同于球形结构的炮塔, 多边形炮塔具有明显的棱角特征。五边形结构炮塔的简化图如图3所示。

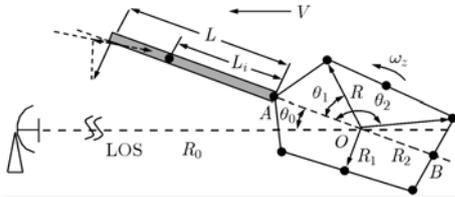


图3 雷达探测五边形炮塔示意图

转动轴心到炮管根部的距离、到前后两角的距离均为 R ; 到炮塔长边和短边的距离分别为 R_1 和为 R_2 。 θ_1 和 θ_2 为炮塔前后两个角相对炮塔轴线的角度位置。

同 2.1 节的推导过程可得五边形炮塔产生的多普勒频率为

$$f_{\text{Turr}} = 2[V + \omega_z r \sin(\theta + \omega_z t + \theta_0)]/\lambda \quad (22)$$

其中 $0 \leq r \leq R_\theta$, $-\pi \leq \theta \leq \pi$ 。 R_θ 表示与 θ 对应的角度上各散射点极坐标半径的最大值。式中第二项为炮塔转动激励的微多普勒频率。炮管的多普勒表达式同式(21)。

3.3 基于微多普勒特征参数估计与身份识别

由上述分析可推知目标微多普勒的理论特征。对于球形炮塔及其炮管由于具有圆形的面目标结构和转动特征, 其时频谱为转动线目标与圆形的面目标谱的复合。由炮塔产生的微多普勒与轮结构^[8]类似, 应为谱宽一定且时不变的结构。

由式(20)可知, 任意时刻炮塔边缘上 LOS 两侧对称散射点将产生微多普勒的最大值和最小值, 且炮塔多普勒带宽分别为

$$f_{\text{TurrMax}} = 2(V + \omega_z R)/\lambda,$$

$$f_{\text{TurrMin}} = 2(V - \omega_z R)/\lambda,$$

$$B_{\text{Turr}} = f_{\text{TurrMax}} - f_{\text{TurrMin}} = 4\omega_z R/\lambda$$

波长 λ 为已知量, 平动速度 V 很容易测得, $\hat{\omega}_z$ 和 $[\hat{f}_{\text{TurrMin}}, \hat{f}_{\text{TurrMax}}]$ 由微多普勒频谱可估计得出; 于是

可得到球形炮塔半径的估计值为

$$\hat{R} = \lambda(\hat{f}_{\text{TurrMax}} - \hat{f}_{\text{TurrMin}})/(4\hat{\omega}_z) = \lambda\hat{B}_{\text{Turr}}/(4\hat{\omega}_z) \quad (23)$$

由式(21)知, 炮管的微多普勒应具有正弦周期特征, 炮管末端炮口处和根部的反射将产生微多普勒的最大值和最小值, 分别为

$$f_{\text{BarrMax}} = 2[V + \omega_z(L + R)]/\lambda$$

$$f_{\text{BarrMin}} = 2(V + \omega_z R)/\lambda$$

于是, 炮管长度的估计值为

$$\hat{L} = \lambda(\hat{f}_{\text{BarrMax}} - \hat{f}_{\text{BarrMin}})/(2\hat{\omega}_z) \quad (24)$$

对于五边形炮塔及其炮管由于具有棱角特征, 且炮塔长边和短边相差较大, 故旋转时产生的微多普勒谱宽具有时变特征, 据此即可将球形炮塔和多边形炮塔区别开。

由式(22)及图3知, 当炮管根部和炮塔后缘中点的连线 AB 与 LOS 垂直时, 炮塔旋转产生的微多普勒谱宽最宽。两处散射点将产生微多普勒的最大值和最小值, 分别为

$$f_{\text{TurrMax}} = 2(V + \omega_z R_2)/\lambda$$

$$f_{\text{TurrMin}} = 2(V - \omega_z R)/\lambda$$

$$B_{\text{TurrMax}} = f_{\text{TurrMax}} - f_{\text{TurrMin}} = 2\omega_z(R_2 + R)/\lambda$$

当 AB 与 LOS 重合或平行时, 炮塔旋转产生的微多普勒谱宽最窄, 并且有

$$f'_{\text{TurrMax}} = 2(V + \omega_z R_1)/\lambda$$

$$f'_{\text{TurrMin}} = 2(V - \omega_z R_1)/\lambda$$

$$B'_{\text{TurrMin}} = f'_{\text{TurrMax}} - f'_{\text{TurrMin}} = 4\omega_z R_1/\lambda$$

同理, $[\hat{f}'_{\text{TurrMin}}, \hat{f}'_{\text{TurrMax}}]$, $[\hat{f}'_{\text{TurrMin}}, \hat{f}'_{\text{TurrMax}}]$ 和 $\hat{\omega}_z$ 由微多普勒频谱可以估计得出; 于是可得到炮塔尺寸的估计值为

$$\hat{R} = (\lambda\hat{f}'_{\text{TurrMin}}/2 - \hat{V})/\hat{\omega}_z \quad (25)$$

$$\hat{R}_1 = \lambda(\hat{f}'_{\text{TurrMax}} - \hat{f}'_{\text{TurrMin}})/(4\hat{\omega}_z) = \lambda\hat{B}'_{\text{TurrMin}}/(4\hat{\omega}_z) \quad (26)$$

$$\hat{R}_2 = (\lambda\hat{f}_{\text{TurrMax}}/2 + \hat{V})/\hat{\omega}_z \quad (27)$$

同理, 炮管长度的估计值为

$$\hat{L} = \lambda(\hat{f}_{\text{BarrMax}} - \hat{f}_{\text{BarrMin}})/(2\hat{\omega}_z) \quad (28)$$

提取的特征及估计得到的参数是对目标精确身份识别的重要信息。

至此可给出基于微多普勒特征提取的, 对不同类型坦克目标精确身份识别的一般步骤:

步骤 1 根据微多普勒时频谱的谱宽特征判定目标炮塔形状。

步骤 2 测得平动速度 \hat{V} , 由微多普勒谱的周期性, 估计炮塔转速 $\hat{\omega}_z$ 。

步骤 3 提取微多普勒谱的各极值, 计算炮塔

及炮管尺寸的估计值。

步骤 4 对目标做出较精确的身份识别。

4 仿真实验

仿真由推导的理论公式得出的理论微多普勒时频分布和由目标运动模型仿真的回波经过平滑伪 Wigner-Ville 分布 (SPWVD) 后得到的微多普勒时频特征, 对仿真结果进行比较分析, 以验证理论推导的正确性。为揭示理论特征, 反映各频率分量的变化规律, 对理论特征的计算中, 散射点模型的密度设为仿真时模型的 10 倍。

设雷达工作频率 10 GHz, 目标速度 $V=60$ km/h, 初始时刻炮管与目标行进方向夹角为 $\theta_0 = 90^\circ$, 观测时间 12 s。目标各参数的选取参照实际主战坦克的典型值。

4.1 球形炮塔微多普勒特征仿真

炮塔半径 $R=1.6$ m, 炮管长度 $L=6$ m, $\omega_z = 2\pi/9$ (rad/s), $\omega_J = \pi/18$ (rad/s), 最大俯仰角 $\phi = \pi/9$ 。分别仿真由式(20)和式(21)计算得到的理论微多普勒时频分布如图 4(a)和图 4(b)所示, 图中圆圈处为由炮管俯仰运动导致的特征。图 4(c)为仅考虑炮管俯仰运动分量的微多普勒特征, 图 4(d)为整体的微多普勒时频谱。

可见, 由于球形炮塔具有对称结构, 其整体微多普勒时频特征比较稳定, 微多普勒瞬时带宽具有时不变性。炮管的微多普勒具有明显的类似正弦的周期性。图 4(e)为回波的频谱, 易见约 1100 Hz 处

的车体回波最强, 其次是炮塔, 炮管的回波最弱。从图 4(f)回波的微多普勒谱可提取出目标的有用参数, 炮塔转动周期的估计值为 $\hat{T}=9$ s, 则 $\hat{\omega}_z = 2\pi/\hat{T} = 2\pi/9$ (rad/s)。炮塔多普勒带宽的估计值约为 $\hat{B}_{Turr}=150$ Hz, 则炮塔半径的估计值为 $\hat{R} = \lambda \hat{B}_{Turr}/4\hat{\omega}_z = 1.6144$ m。同理可得估计值 $\hat{f}_{BarrMax} = 1470$ Hz, $\hat{f}_{BarrMin} = 1185$ Hz, 由式(24)得炮管长度的估计值 $\hat{L} = 6.1235$ m。

4.2 五边形炮塔微多普勒特征仿真

设 $R=3.6$ m, $R_1=1.8$ m, $R_2=0.866R=3.1176$ m, $L=5$ m, $\omega_z = \pi/4$ (rad/s), $\omega_J = \pi/12$ (rad/s), $\phi = \pi/6$ 。仿真由式(22)计算得到的理论微多普勒如图 5(a)所示, 可见其分布与图 4(a)明显不同。

同理, 从图 5(f)提取微多普勒特征并估计目标参数, $\hat{T}=8$ s, $\hat{\omega}_z = \pi/4$ (rad/s), $\hat{f}_{TurrMin} = 950$ Hz, $\hat{f}_{TurrMax} = 1300$ Hz, $\hat{f}_{TurrMin} = 1015$ Hz, $\hat{f}_{TurrMax} = 1205$ Hz。由式(25)-式(27)得 $\hat{R} = 3.6075$ m, $\hat{R}_1 = 1.8144$ m, $\hat{R}_2 = 3.077$ m。 $\hat{f}_{TurrMin} = 1300$ Hz, $\hat{f}_{TurrMax} = 1560$ Hz, 由式(28)得 $\hat{L} = 4.9656$ m。

对炮管俯仰的微多普勒特征, 用炮口处的散射点进行研究, 即令式(21)中的 $\omega_z = 0, L_i = L, \theta_0 = 0^\circ, V = 0$ 。经计算, 两炮管俯仰产生的微多普勒可能的最大值分别为 $f_{BarrMax1} = 23.88$ Hz, $f_{BarrMax2} = 43.63$ Hz, 如图 4(c)和图 5(c)所示。这对于整个目标微多普勒特征的影响可以忽略不计。

车体的多普勒频率为图 4(f)和图 5(f)中 1100 Hz 处的直线。从仿真结果可见, 由时频分析得到的微

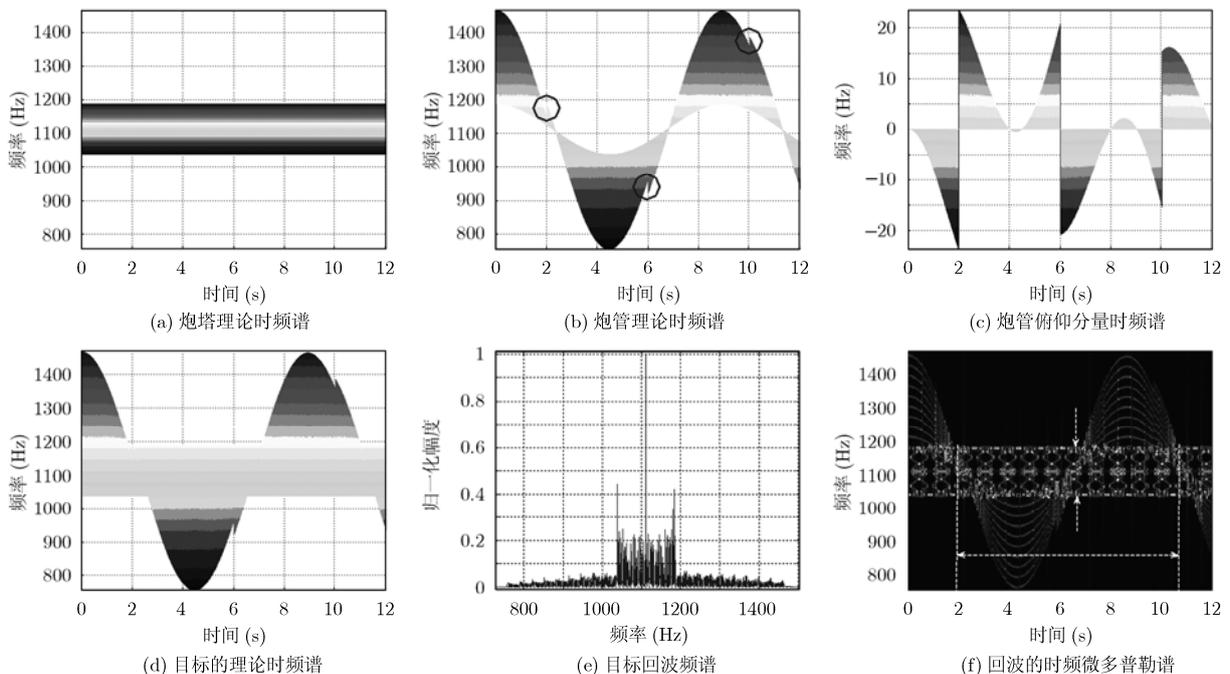


图 4 球形炮塔目标时频微多普勒特征

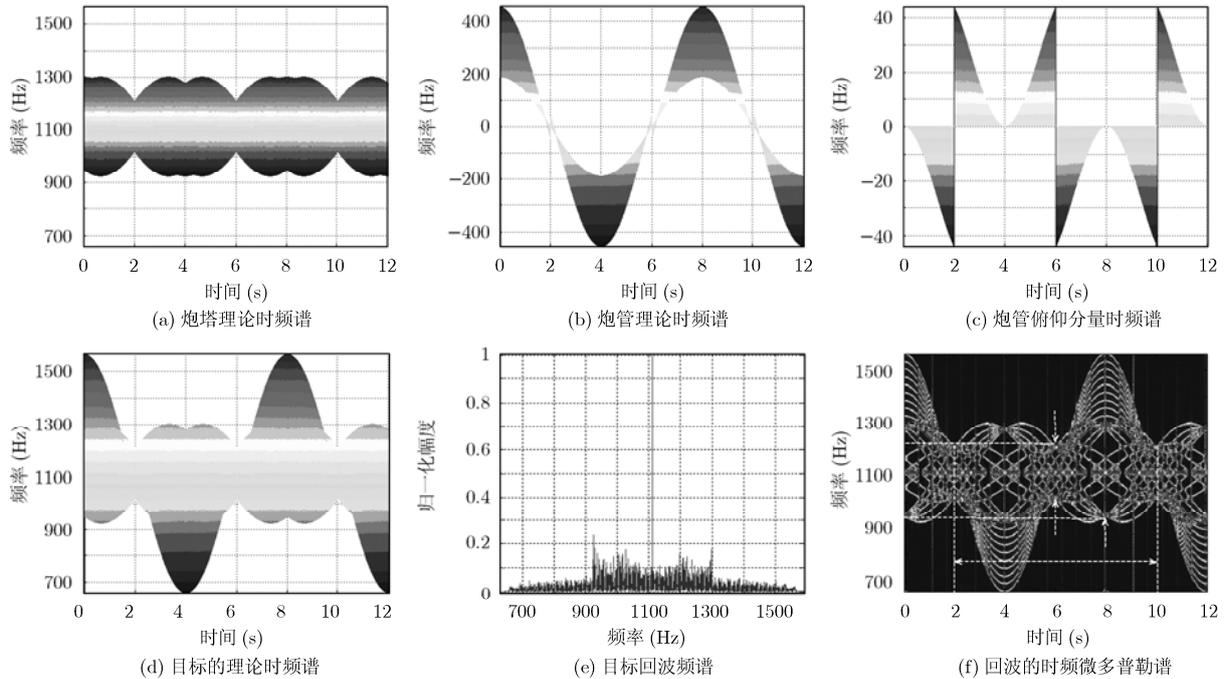


图5 五边形炮塔目标时频微多普勒特征

多普勒谱与理论计算得到的一致,证明了理论推导结果的正确性。

5 结论

本文讨论了坦克目标炮塔运动的微多普勒特征,推导了由球形炮塔和多边形炮塔的转动及炮管俯仰运动激励的微多普勒的理论公式。分析了炮塔和炮管微动的理论时频特征,据此提出了基于微多普勒特征提取的目标参数估计方法。仿真了目标理论微多普勒谱的完整时频分布和经高分辨时频变换得到的微多普勒谱。

理论和仿真结果表明,炮管俯仰的微多普勒十分微弱对时频谱的影响可忽略不计;炮塔旋转激励的微多普勒谱具有类似正弦的周期性,由球形炮塔激励的微多普勒谱宽不随时间变化,而多边形炮塔由棱角结构激励的谱宽具有周期时变性,据此可将两种目标区分开。基于微多普勒特征提取的目标参数估计值与真实值的误差很小,故可用于对坦克目标的运动状态判断和尺寸估计,是对目标进行精确身份识别和型号判断的极具价值的重要信息。

参考文献

- [1] Li Y, Liu H W, and Bao Z. Radar HRRP recognition based on the minimum Kullback Leibler distance criterion[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2007, 24(2): 199-203.
- [2] 高倩, 刘家学, 吴仁彪. 一种基于高分辨率距离像自动目标识别新方法[J]. *中国民航学院学报*, 2002, 20(1): 1-4.
Gao Qian, Liu Jia-xue, and Wu Ren-biao. Novel method for automatic target recognition based on high resolution range profiles[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2002, 20(1): 1-4.
- [3] Guo W, Qi Q, Jiang L L, and Zhang P. A new method of SAR image target recognition based on AdaBoost algorithm[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, Boston, Massachusetts, July, 2008, III: 1194-1197.*
- [4] Tong L B, Lu W J, and Qi D N, *et al.* Target recognition based on seismic sensors and neural network[C]. *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI'2007, Xi'an, 2007, 1: 18-21.*
- [5] Smith G E, Woodbridge K, and Baker C J. Template based micro-Doppler signature classification[C]. *Radar Conference, Manchester, UK. 3rd European, Sept., 2006: 158-161.*
- [6] Stove A G and Sykes S R. A Doppler-based automatic target classifier for a battlefield surveillance radar[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Radar, Edinburgh, UK, October, 2002: 419-423.*
- [7] Kulpa K. *Advances in Sensing with Security Applications: Continuous Wave Radars-monostatic, Multistatic and Network[M]*. ser. NATO Security through Science Series, Netherlands: Springer, 2006: 215-242.
- [8] Ghaleb A, Vignaud L, and Nicolas J M. Micro-Doppler analysis of wheels and pedestrians in ISAR imaging[J]. *IET Signal Process.*, 2008, 2(3): 301-311.
- [9] Tan H S, Ma C Z, and Yeo T S, *et al.* ISAR imaging of targets with moving parts using micro-Doppler detection on the range profile image[C]. *IEEE International IGARSS, Barcelona, Spain. July, 2007: 499-502.*

黄健: 男, 1975年生, 硕士生, 研究方向为动目标检测。

李欣: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为SAR成像技术。

黄晓涛: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 从事阵列信号处理、现代谱估计等领域的研究。

贺峰: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理。