

# 一种新的弹道目标成像匹配识别算法

何兴宇, 童宁宁, 胡晓伟

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 为了能充分利用目标的散射中心对弹道目标进行识别, 提出利用解线频调的方法, 通过对距离向和方位向进行快速傅里叶变换, 实现对目标散射中心成像, 然后从目标 ISAR 像中提取目标特征信息, 提出了一种新的匹配识别的方法实现对目标的分类识别。该方法利用提取的散射中心的位置和幅度信息, 通过构造匹配度矩阵, 进而与预设门限比较, 判定目标类别。仿真实验及识别性能评估表明, 该方法在设定情况下具有良好的目标识别能力。

**关键词** ISAR; 解线频调; 散射中心; 匹配矩阵; 评估

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.010

**中图分类号** TN957.52 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0038-04

## A New Recognition Algorithm for Ballistic Targets in Imaging Matching

HE Xing-yu, TONG Ning-ning, HU Xiao-wei

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to recognise the ballistic target by effectively utilizing the scattering centers of the target, a dechirping method is proposed. First, by proceeding planar FFT, the imaging for target's scattering center is achieved, and then target's feature information is extracted from its ISAR imaging. Finally, a new matching recognition method is proposed to realize target's classification. The method is used for judging target's classification by extracting the information from the scattering centers' position and amplitude through constructing matching matrixs and again comparing with the preinstall threshold. The simulations and the assessments of classified performance show that the method is efficient in target's recognition under the set conditions.

**Key words:** ISAR; dechirp; scattering center; matching matrix; assessment

地面多功能雷达获取的高分辨一维距离像只能反映目标的径向一维信息, 一维距离像能携带的信息少并且敏感于目标的姿态变化。但逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)可以通过横向分辨将这些距离上重合的点分开, 从而获得目标的二维分布, 极大提高目标的信息量, 是战略

防御系统中极有前途的一种目标识别手段<sup>[1-4]</sup>。

逆合成孔径雷达成像基于目标的散射点模型, 即认为在不大的角度范围里, 目标可用位置、强度不变的散射点表示它的散射特征<sup>[1]</sup>。文献[5~6]分析并仿真了弹道目标回波, 介绍了 ISAR 中的信号处理和特征提取技术, 文献[7~8]分析了转动目标的

收稿日期: 2013-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372166); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM8308)

作者简介: 何兴宇(1989-), 男, 河北行唐人, 主要从事雷达信号处理研究。E-mail: hxy\_19890708@163.com

**引用格式:** 何兴宇, 童宁宁, 胡晓伟. 一种新的弹道目标成像匹配识别算法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(4): 38-41. HE Xingyu, TONG Ningning, HU Xiaowei. A new recognition algorithm for ballistic targets in imaging matching[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 38-41.

ISAR 成像方法及其发展。为了更好地对目标成像,需要选用时宽带宽较大的信号,本文基于目标的散射点成像,通过散射点特性匹配实现目标的识别。选用线性调频信号,用解线频调的方法对线性调频信号处理,实现对散射中心成像,再进行目标成像信息的提取,获得目标散射中心的位置和幅度信息,通过匹配识别,判断目标所属的目标类,最后利用 ROC 曲线完成了对识别性能的评估。

## 1 解线频调与散射中心成像

发射的 LFM 信号可写成:

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) e^{j2\pi(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2)} \quad (1)$$

式中:  $\hat{t}$  称为快时间;  $f_c$  为中心频率;  $T_p$  为脉宽;  $\gamma$  为调频率。

设参考距离为  $R_{\text{ref}}$ , 则参考信号为<sup>[1]</sup>:

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_{\text{ref}}/c}{T_{\text{ref}}}\right) e^{j2\pi(f_c(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}) + \frac{1}{2}\gamma(t - \frac{2R_{\text{ref}}}{c})^2)} \quad (2)$$

某点目标到雷达的距离为  $R_i$ , 雷达接收到的该目标信号  $s_r(\hat{t}, t_m)$  为:

$$s_r(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T_p}\right) e^{j2\pi(f_c(t - \frac{2R_i}{c}) + \frac{1}{2}\gamma(t - \frac{2R_i}{c})^2)} \quad (3)$$

若  $R_\Delta = R_i - R_{\text{ref}}$ , 则其差频输出为:

$$s_{if}(\hat{t}, t_m) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R_i/c}{T_p}\right) e^{-j\frac{4\pi}{c}\gamma \hat{t}(\frac{2R_{\text{ref}}}{c} - R_\Delta)} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c R_\Delta} e^{j\frac{4\pi}{c}\gamma R_\Delta} \quad (4)$$

将上式的差频信号对快时间作傅里叶变换,由此得到在差频域中的表示式为:

$$S_{if}(f_i, t_m) = AT_p \text{sinc} \cdot [T_p(f_i + 2\frac{\gamma}{c}R_\Delta)] e^{-j\frac{4\pi}{c}f_c R_\Delta} e^{j\frac{4\pi}{c}\gamma R_\Delta} e^{-j\frac{4\pi}{c}f_i R_\Delta} \quad (5)$$

然后通过去斜处理,再经逆变换变回到时域。

对上述得到的每次回波进行 FFT 变换,得到目标一维距离像信息,对得到的多次一维距离像对慢时间作傅里叶变换,得到目标散射中心 ISAR 二维成像结果。此时,目标纵向分辨率与带宽成反比,横向分辨率与观测时间内目标转过的角度成反比。

## 2 特征量匹配识别

如果直接利用得到的目标散射中心图像判断目

标类别,将有很大的不确定性,因此,本文提出了利用散射中心特征量匹配的识别方法。

经过上面的散射中心成像,得到包含散射中心的位置及幅度信息的散射中心分布情况。设  $(p_i, q_i), i=1, 2, \dots, N$  为得到的目标各散射中心的信息,其中  $p_i$  为目标第  $i$  个散射点的位置,  $q_i$  为第  $i$  个散射点的幅度,  $N$  为目标散射点个数。同样  $(p_i, q_i)(i=1, 2, \dots, M)$  为模板散射中心分布信息,  $p_i$  为模板散射中心位置,  $q_i$  为模板散射中心幅度,  $M$  为模板散射中心个数。

弹头目标 ISAR 图像散射点较少,因而每个散射点包含的信息量就相对较多,所以在一定的姿态角范围内且不考虑遮挡,识别出的目标散射中心数目应与成像得到的散射中心数目相同,进行匹配识别时要舍去与提取得到的散射中心数目不一致的模板。对剩余模板及成像得到的散射中心信息进行以下处理:

**步骤 1** 将每组散射中心幅度按最大值进行归一化,得到归一化幅度:

$$\mu_i = \frac{q_i}{\max_i q_i}, i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

**步骤 2** 建立目标对各个模板的位置差矩阵,构造如下:

$$D_p = \begin{bmatrix} dp_{11} & \dots & dp_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ dp_{N1} & \dots & dp_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $dp_{ij} = |p_i - p_j|$ , 即为目标各个散射中心与模板各个散射中心的位置差绝对值。从  $D_p$  矩阵各行各列取一个元素并求和,得到和最小的一种取法,并将最小和记为  $d_p$ ;

**步骤 3** 建立目标对各个模板的幅度差矩阵,并且由于幅度强的散射中心对于表征目标的结构特征贡献较大,因此幅度差矩阵构造如下:

$$D_q = \begin{bmatrix} dq_{11} & \dots & dq_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ dq_{N1} & \dots & dq_{NN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中  $dq_{ij} = \mu_i |q_i - q_j|$ , 即为目标各个散射中心与样本各散射中心的幅度差的绝对值与归一化幅度的乘积。从  $D_q$  矩阵各行各列根据步骤 2, 取  $D_p$  矩阵中的对应元素,然后求和,并将其记为  $d_q$ ;

**步骤 4** 计  $d = (d_p^2 + d_q^2)^{1/2}$ , 设置门限值  $\eta$ , 如果  $d < \eta$ , 则判断目标为真, 否则判为假目标。

## 3 识别性能评估

在上一步中,选择适当的  $\eta$  有助于反导系统在

低的虚警概率下获得较高的识别率。因此,弹道真假目标识别在本质上是一个风险最小的寻优过程,等同于 Neyman-Pearson 决策。

文献[9]提出了一种基于 ROC 曲线的弹道目标识别评估方法,通过计算 ROC 曲线下的面积(AUC)对识别方法进行评估。为此,定义如下:

$$\epsilon_1 = \int_{\Omega_2} p(x | \omega_1) dx \Rightarrow \text{第 1 类错误(虚警) 概率;}$$

$$\epsilon_2 = \int_{\Omega_1} p(x | \omega_2) dx \Rightarrow \text{第 2 类错误(漏警) 概率。}$$

令  $\mu$  为 Lagrange 乘子,  $\epsilon_0$  为约束虚警率,构造目标函数:

$$J = P(H_0 | H_1) + \mu [P(H_1 | H_0) - \epsilon_0] = \int_{\Omega_1} p(x | \omega_2) dx + \mu \left\{ \int_{\Omega_2} p(x | \omega_1) dx - \epsilon_0 \right\} \quad (9)$$

即求取给定虚警概率下的最大识别概率。

对于不同的识别方法,其对应的 ROC 曲线也不同。见图 1。

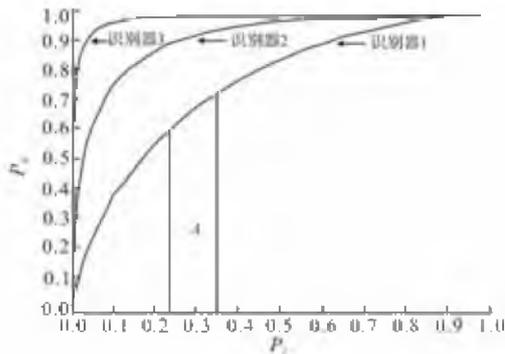


图 1 3 种分类器的 ROC 曲线

Fig.1 Curves of three classifiers' ROC

图中,  $P_f$  为虚警概率,  $P_d$  为正确识别概率。ROC 曲线越靠近左上角,其对应的识别器性能越好,在图 1 中,识别器 3 的性能是最好的。但是,一种分类器不一定在每个操作点都有较好的识别性能。因此,可以用识别器 ROC 曲线下方对应虚警概率区间面积来表征识别器性能好坏,见图 1 中区域 A 所示, A 越大识别性能越好。

### 4 仿真分析

仿真采用发射线性调频信号。脉冲宽度  $T_p = 40 \mu s$ , 中心频率  $f_c = 6 \text{ GHz}$ , 信号带宽  $B = 300 \text{ MHz}$ , 采样频率  $F_s = 300 \text{ MHz}$ , 脉冲重复频率 prf = 50 Hz, 转台角速度  $\omega = 0.01 \text{ rad/s}$ , 同时,为了获得清晰的 ISAR 图像,应使方位分辨率与距离分辨率相同,即  $\rho_r = \rho_a$ , 而距离分辨率理论值为  $\rho_r = c/2B$

$= 0.5 \text{ m}$ , 故成像段目标总转角满足  $\Delta\theta = \lambda/2\rho_a = 0.06 \text{ rad}$ 。

图 2 为利用解线频调方法得到散射中心图像。图 3 为包含目标幅度信息的散射中心成像结果。

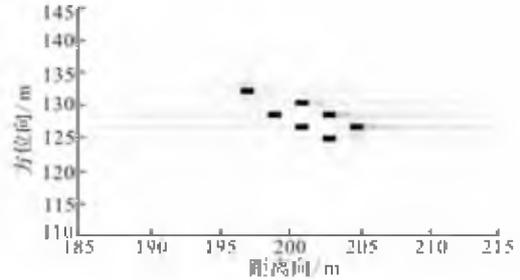


图 2 距离和方位维同时进行 FFT 变换得到的散射中心图像

Fig.2 Scattering center image under planar FFT

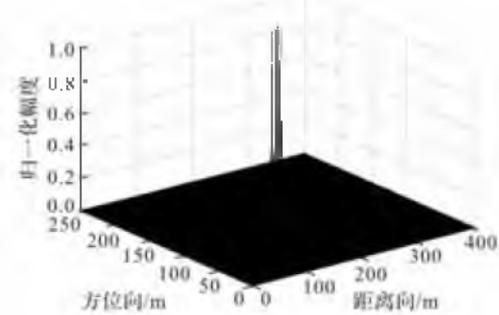


图 3 包含散射中心幅度信息的成像结果

Fig.3 Imaging containing the amplitude of target's scattering centers

从图 2 可以看出,解线频调实现散射中心成像效果清晰,可以从中提取散射中心位置信息;从图 3 中提取散射中心幅度信息。利用得到的目标散射中心成像结果,依据本文提出的匹配识别方法,根据提取的目标散射中心位置和幅度信息,然后构造目标与模板的位置差与幅度差矩阵,按照匹配识别过程得到匹配识别结果。

文献[9]提出了比较好的 3 种分类器的构造方法。其中所提取的特征包含目标窄带及宽带特征,包括目标长度、频率、调制频率等。

但是,由于反导系统常常面临的是非合作目标,目标的特征不易获取,在实际中以上分类器的识别效果会受到限制。

假设目标散射中心位置差  $d_p$  和幅度差  $d_q$  均服从零均值高斯分布,且相互独立,而  $d$  服从瑞利分布。设定不同的门限会有不同的虚警概率与识别概率。当信噪比为 10 dB 和 15 dB 时,以上 3 种分类器及本文识别方法对应的 ROC 曲线分别见图 4 ~ 图 5。

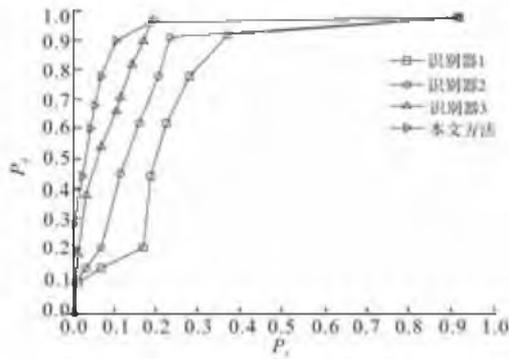


图4 SNR=10 dB时不同分类器的ROC曲线

Fig.4 Curves of different classifiers' ROC while SNR=10 dB

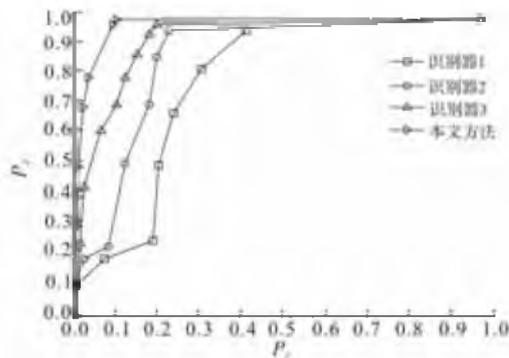


图5 SNR=15 dB时不同分类器的ROC曲线

Fig.5 Curves of different classifiers' ROC while SNR=15 dB

实际中虚警率的值通常远小于0.1,从图4~图5可以看出,本文方法在此虚警概率下对应的ROC曲线下方面积要大于其他3种识别方法,故识别效果较其它3种方法要好,证明本文方法在虚警率较低的情况下能得到较高的识别率,且随着信噪比的增大,识别性能的提高较其他3种分类器要明显。

## 5 结语

本文在利用解线频调方法处理线性调频信号的基础上,实现了对目标散射中心的成像,进而利用提出的匹配识别的方法完成对目标的分类识别。仿真实验证明,基于解线频调的成像方法对散射中心具有较好的成像效果,对识别性能的评估证明,本文提出的匹配识别方法有较好的目标识别效果。然而,对于高速机动类目标及弹头微动较复杂的情况下,该方法需进一步完善。

### 参考文献(References):

[1] 周万幸.弹道导弹雷达目标识别技术[M].北京:电子工业出版社,2011.  
ZHOU Wanxing. BMD radar target recognition technology[M]. Beijing: Electronic industry press, 2011.

(in Chinese)

- [2] 陈秀伟,张云华,张祥坤.弹道导弹的ISAR回波模拟[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(1): 29-34.  
CHEN Xiuwei, ZHANG Yunhua, ZHANG Xiangkun. Ballistic missile echo simulation based on ISAR[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 29-34.(in Chinese)
- [3] BAO Weimin, ZHANG Xiaoqin, ZHAO Liping. Parameter estimation method based on parameter function surface[J]. Science China: technological sciences, 2013,56: 1485-1498.
- [4] 保铮,邢孟道,王彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.  
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Electronic industry press, 2005.(in Chinese)
- [5] Thayaparan T, Frangos P, Stankovic L. Signal processing techniques for ISAR and feature extraction[J]. IET signal processing, 2008,2(3): 189-191.
- [6] WANG Jun, WEI Shaoming, SUN Jinping, et al. A GTD model and state space approach based method for extracting the UWB scattering center of moving target[J]. Science China: information sciences, 2011,54: 182-196.
- [7] 贺思三,龙戈农,赵会宁,等.非均匀转动目标ISAR成像及横向定标[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(4): 36-40.  
HE Sisan, LONG Genong, ZHAO Huining, et al. ISAR imaging and cross scaling for non-uniform rotating targets[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(4): 36-40. (in Chinese)
- [8] Debora Pastina. Rotation motion estimation for high resolution ISAR and hybrid SAR/ISAR target imaging[C]//IEEE radar conference. Rome: IEEE press, 2008: 1674-1679.
- [9] 陈志杰,冯德军,王雪松.基于ROC曲线的弹道目标识别评估及优化[J].系统仿真学报,2007,19(17): 4028-4032.  
CHEN Zhijie, FENG Dejun, WANG Xuesong. Assessment & optimization of ballistic target recognition based on ROC curves[J]. Journal of system simulation, 2007,19(17): 4028-4032.(in Chinese)

(编辑:田新华)