

# 基于一维距离像的弹道中段目标特征提取

赵振冲 王晓丹 毕 凯 邢雅琼

(空军工程大学防空反导学院 西安 710051)

**摘 要** 针对目标的 HRRP 投影长度提取不精确的问题,首先研究了中段目标的进动特性及其一维距离像在不同雷达视线角下的变化规律,提出了一种基于差分算法的目标投影长度提取方法。该方法利用了目标一维距离像散射中心的峰值效应,使处理后的一维距离像只在散射中心处出现震荡效应,以此准确提取散射中心,克服了传统长度提取方法在散射中心周围重复搜索造成的误差。在此基础上,分析了目标投影长度随进动的变化规律,提出了一种进动角和目标真实长度提取方法。仿真实验表明以上方法具有很好的提取精度。

**关键词** 弹道目标,一维距离像,特征提取

**中图法分类号** TP391.4 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.1.057

## Feature Extraction of Ballistic Midcourse Target Based on HRRP

ZHAO Zhen-chong WANG Xiao-dan BI Kai XING Ya-qiong

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

**Abstract** This paper first researched the precessional features of midcourse target and its HRRP in different radar posture angles and presented a new projective length abstract method. Based on the peak of the scattering center, this method makes the HRRP present a oscillation phenomenon on this account to abstract scattering center accurately. On this basis, this paper analysed the projective length with precessional motion and presented a new feature abstraction method on precessional angle and the length of the target. Simulation shows that the two methods can work accurately.

**Keywords** Ballistic targets, HRRP, Feature extraction

## 1 引言

相比于碎片和诱饵,具有姿态控制的弹头在飞行过程中由于受到干扰而产生的进动是其特性。径向长度特征是表征目标结构的一个重要特征,弹头的长度与诱饵、碎片有着明显区别。因此,目标长度和进动参数的提取对区分真假弹头和诱饵有着重大意义<sup>[1-4]</sup>。

传统的基于一维距离像(HRRP)的目标径向长度提取方法有:基于傅里叶变换(FFT)的非参数方法、基于 MUSIC 的方法、基于矩阵束的方法、基于 TLS-ESPRIT 的方法和基于模型参数估计的超分辨率方法<sup>[4,5]</sup>等,其中超分辨率方法可以直接求解散射点的位置参数,但是求解过程涉及大量的矩阵分解运算,算法复杂,运算量大;而傅里叶变换法虽然算法简单,但是这对散射点位置的估计精度却不高,文献[4]对以上方法进行了综合,提高了精确度。这些方法都只能提取目标在雷达视线(RLOS)上的投影长度。文献[6]提出了一种基于最大似然估计的长度提取算法,但是该方法要在时间域循环搜索最佳解,并且要事先给出进动角的大小。文献[7]提出同时利用多部雷达的观测数据进行长度提取,但是这对投影模型的近似表示与真实情况存在较大误差。

对于进动角的提取,文献[8]通过分析目标散射中心与雷达的径向距离来提取进动角,这种方法会受雷达测距误差的影响,并且由于进动而不能保证每次测得的都是同一散射中心。文献[9]通过分析锥体目标底部的两个对称的散射中心随进动的变化规律来提取进动角,但是实际中弹头底部的两点投影距离非常小<sup>[7]</sup>,并且由于雷达视线的遮挡,通常只出现一个散射中心。文献[10,11]都通过目标的 HRRP 长度变化来建立方程,但前者要经过较长时间分别在不同雷达视线下建立多个方程并,后者要在 3 个未知数间重复搜索最优解。

本文首先对弹道目标建模,分析了在不同姿态角下其一维距离像的成像特点,推导出了进动情况下一维距离像的长度随目标进动的变化规律,得出了目标的简化进动模型;然后提出了一种基于差分函数的目标投影长度估计方法,提高了目标投影长度的估计精度;并以此为基础,利用目标投影长度因进动造成的周期性的变化,求解目标的真实长度和进动角。

## 2 进动弹道目标的 HRRP 特性

弹头的形体较为简单,一般是锥、柱、球冠的组合物,这里以圆锥体为例(见图 1)。设锥体高为  $h$ ,底面半径为  $R$ ,半锥角为  $\alpha$ ,雷达视线与进动轴的夹角即平均视线角为  $\gamma$ ,雷达视

到稿日期:2014-01-20 返修日期:2014-04-30 本文受国家自然科学基金项目(61273275,60975026)资助。

赵振冲(1990-),男,硕士生,主要研究方向为智能信息处理,E-mail:wwjyzcc@163.com;王晓丹(1966-),女,教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息处理和机器学习;毕 凯(1985-),男,博士生,主要研究方向为智能信息处理;邢雅琼(1985-),女,博士生,主要研究方向为智能信息处理。

线与锥体轴线的夹角即姿态角为  $\beta$ , 进动角速度为  $\omega$ , 自旋角速度为  $\Omega$ , 以进动轴为  $z$  轴、锥体底面中心为原点建立直角坐标系, 如图 1 所示, 其中  $yoz$  平面与雷达入射波平面平行。设初始时刻  $OA$  的方位角为  $\varphi_0$ , 则姿态角随时间变化可表示为:

$$\beta(t) = \arccos(\cos(\theta)\cos(\gamma) + \sin(\theta)\sin(\gamma)\sin(\omega t + \varphi_0)) \quad (1)$$

根据几何绕射理论, HRRP 的每一个散射中心相当于斯特拉顿-朱(Stratton-Chu)积分的一个不连续处, 即目标的曲率不连续处<sup>[10]</sup>。因此, 高频照射条件对应的锥体散射特性主要由锥体顶点  $A$  以及入射场方向与锥体对称轴构成的平面与底面边缘的两个交点  $B$ 、 $C$  确定。

由于遮挡效应, 不同姿态角下目标的一维距离像的长度是不同的。下面给出目标 HRRP 的投影长度  $L_{hrrp}$  随  $\beta$  的变化规律。

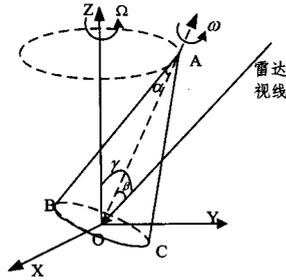


图1 目标进动模型

1.  $\beta < \alpha$

如图 2(a) 所示, 此时一维距离像的两端点散射中心分别是  $A$  和  $B$ , 投影长度为:

$$L_{hrrp} = h\cos(\beta) + R\sin(\beta) \quad (2)$$

2.  $\alpha \leq \beta < \pi/2 - \alpha$

如图 2(b) 所示, 此时散射中心  $B$  被隐藏, 一维距离像两端的散射中心分别为  $A$  和  $C$ , 长度为:

$$L_{hrrp} = h\cos(\beta) - R\sin(\beta) \quad (3)$$

3.  $\pi/2 - \alpha \leq \beta < \pi/2$

如图 2(c) 所示, 此时一维距离像两端的散射中心分别为  $C$  和  $A$ , 长度为:

$$L_{hrrp} = R\sin(\beta) - h\cos(\beta) \quad (4)$$

4.  $\pi/2 \leq \beta < \pi/2 + \alpha$

如图 2(d) 所示, 此时一维距离像两端的散射中心为  $C$  和  $B$ , 长度为:

$$L_{hrrp} = 2R\sin(\pi - \beta) \quad (5)$$

5.  $\pi/2 + \alpha \leq \beta < \pi - \alpha$

如图 2(e) 所示, 此时一维距离像两端的散射中心为  $C$  和  $A$ , 长度为:

$$L_{hrrp} = h\cos(\pi - \beta) + R\sin(\pi - \beta) \quad (6)$$

6.  $\pi - \alpha \leq \beta < \pi$

此时, 散射中心  $A$  将被隐藏, 一维距离像两端散射中心为  $C$  和  $B$ , 长度为:

$$L_{hrrp} = 2R\sin(\pi - \beta) \quad (7)$$

由弹道防御特殊的攻防条件可知, 地基雷达一般迎着锥顶照射目标, 姿态角较小, 不超过  $80^\circ$ <sup>[10,11]</sup>。因此, 一维距离像只会出现图 2 中的前 3 种情况。对于第二和第三种情况有:

$$L_{hrrp} = l\cos(\beta(t) + \alpha) \quad (8)$$

其中,  $l = h/\cos(\alpha)$  为锥体母线长度, 即此时一维距离像的长度可表示为目标斜边在雷达视线上的投影。对于第一种情况, 有:  $L_{hrrp} = l\cos(\beta(t) + \alpha) + 2R\sin(\beta(t))$ 。由于锥体目标的半锥角  $\alpha$  非常小 (小于  $10^\circ$ ), 又有  $\beta < \alpha, l \geq R$ , 上式第二项非常小, 因此式 (8) 仍近似成立。由以上分析可知, 锥体目标可近似为长度为  $l$  的线性目标。

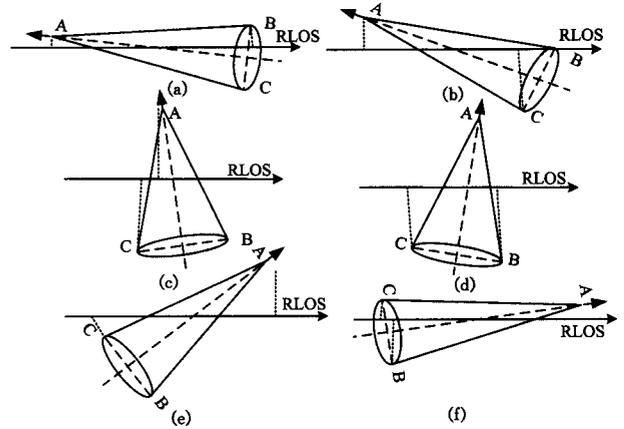


图2 不同姿态角下一维距离像的长度

### 3 基于 HRRP 的特征提取

#### 3.1 目标散射中心提取

准确提取出目标在雷达视线上的投影长度是提取目标真实长度和进动参数首先需要解决的问题。由于基于 FFT 的长度提取方法简单速度快, 因此其成为研究的热点。如何准确地从 HRRP 中区分目标信号和噪声是长度提取的关键。这里有两种常用方法 (设目标  $t$  时刻的一维距离像序列为:  $X(t) = [X_t(1), X_t(2), \dots, X_t(N)]$ ):

对 HRRP 每个距离单元的信号强度设定阈值  $\eta$ , 则采样点与噪声的判决准则为:

$$\begin{cases} X_t(k) \text{ 为噪声,} & \|X(k)\| < \eta \\ X_t(k) \text{ 为散射点,} & \|X(k)\| \geq \eta \end{cases} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

记矢量  $p = \{k | \|X(k)\| \geq \eta, k=1, 2, \dots, N\}$ ,  $c$  为光速,  $\Delta f$  为雷达信号的步进频率, 则目标尺寸的估计值为:

$$\hat{l} = \frac{[\max(p) - \min(p)]c}{2(N-1)\Delta f} \quad (10)$$

门限阈值  $\eta$  的选取是目标长度估计的难点和关键,  $\eta$  值过大或过小都将导致目标长度估计的失真。一般情况下, 门限  $\eta$  计算方法如下:

$$\eta = \mu \sqrt{\sum_{k=0}^{N-1} \|X_t(k)\|^2 / N} \quad (11)$$

式中,  $\|\cdot\|$  表示求取模值;  $\mu$  为门限系数, 其值可由实验确定。

以上方法需要人为设定门限系数, 设定值的正确与否在很大程度上影响长度提取的精确性。文献[6]提出了目标径向长度估计的自适应算法, 它依据最大信噪比准则, 定义目标占据部分为“信号”, 其它部分为“噪声”, 它们的比值为  $r(\theta)$ , 寻求最优分界点, 使得  $r(\theta)$  最大。采用最优化的方法求得最优窗长度为  $w_{opt}$ , 则可求得目标观测长度为:

$$\hat{l} = \frac{w_{opt} \cdot c}{2(N-1)\Delta f} \quad (12)$$

以上方法存在一个缺点:两种方法均会在散射中心周围重复搜索,不能准确提取出散射中心的位置。本文基于 HR-RP 在散射点附近较高的变化速率提出了一种新的目标径向投影距离估计方法,该方法能够克服传统长度估计方法提取精度不足的问题。

定义差分函数:

$$Y(k) = X(k) - X(k - \Delta k) \quad (13)$$

为 HRRP 幅度变化函数,其中  $\Delta k \in N^*$  为步长。设目标在  $k = k_0$  存在散射中心,当  $k = k_1, k_2 (k_1 = k_2 + \Delta k)$  为无散射中心,则有:

$$X(k_0 + \Delta k) - X(k_0) < p < X(k_0) - X(k_0 - \Delta k) \quad (14)$$

其中,  $p = X(k_1) - X(k_2)$  为无散射中心时 HRRP 的变化速率。

式(14)表明,式(13)在散射中心附近将有剧烈的变化,每一个散射中心处会成对地出现一个极大值和一个极小值,并且两者相距  $\Delta k$ ,极大值处即为散射中心的位置,而在附近没有散射中心的地方则不会出现这种现象(见图 3),从而避免了一般基于门限法的长度提取方法在散射中心重复搜索造成的误差。因此可用式(13)对 HRRP 进行预处理,然后提取散射中心。

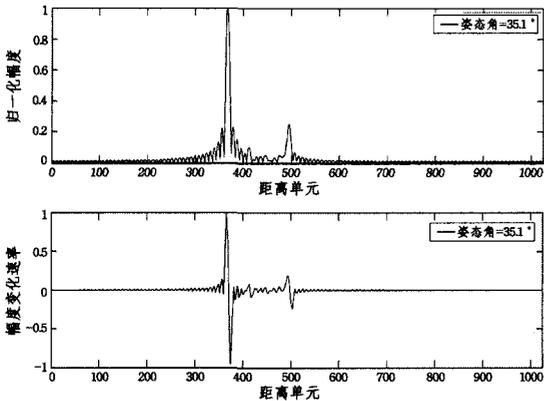


图 3 HRRP 及其用式(13)变换后的对比

式(13)中  $Y(k)$  的值会受到  $\Delta k$  的影响。当  $\Delta k$  较小时,  $Y(k)$  在散射中心周围将出现振荡,如图 4 所示;当  $\Delta k$  较大时,若  $\Delta k$  恰好为两个散射中心的距离,则不同散射中心会出现遮挡,如图 5 所示。设散射中心的宽度为  $s$ ,当  $\Delta k = s/2$  时,  $Y(k)$  在  $Y(k_0)$  处有极大值,在  $Y(k_0 + s/2)$  处有极小值,并且此时任何在距离上无叠加的两个散射中心经处理后的结果不会发生遮挡。

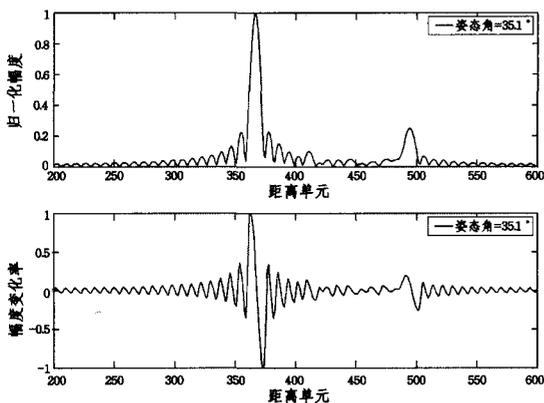


图 4  $\Delta k$  较小时的处理结果

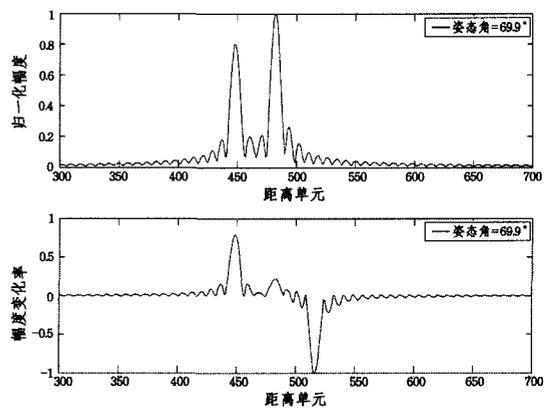


图 5 出现遮挡时的处理结果

利用 HRRP 的变化速率求解投影长度的步骤可归纳如下:

Step 1 对获取的一维距离像进行预处理,滤除直流分量。

Step 2 搜索散射强度最强的散射中心:  $X(k_0) = \max(X(k))$ ,并在  $k_0$  两侧搜索第一极小值,位置分别为  $k_1, k_2$ 。取  $\Delta k = (k_2 - k_1)/2$ ,利用式(13)对 HRRP 进行处理得  $Y(k)$ 。

Step 3 检测  $Y(k)$  的某一极大值为  $Y(k')_{\max}$ ,如果在  $Y(k' + \Delta k)$  处检测出相同幅度的极小值,则  $k = k'$  处有一散射中心,并令  $Y(k) = 0 (k = k' - \Delta k, \dots, k' + \Delta k)$ 。

Step 4 若  $\max(Y(k)) > \eta$ ,  $\eta$  为检测门限,则转 Step 2。

Step 5 若检测到的第一个和最后一个散射中心位置分别为  $k_{start}$  和  $k_{end}$ ,则投影长度为:  $L = (k_{end} - k_{start}) * \Delta R$ ,其中  $\Delta R$  为距离分辨率。

### 3.2 目标长度和进动参数提取

设目标在  $t_0$  时刻的平均视线角为  $\gamma_1$ ,一个进动周期之后的  $t_0 + T$  时刻为  $\gamma_2$ ,则一个周期平均实现角的变化  $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 \leq VT/R$ ,其中,  $V$  为目标相对地心的飞行速度,  $R$  为目标距地心的距离。因此在短时间内  $\gamma$  的变化非常小,可以认为目标 HRPP 的变化只受进动的影响。由式(1)、式(8)可知,目标一维距离像由于受到进动的影响将呈现周期性的变化,并且当  $\beta(t) = \beta_{\max}$  时取得最小值,当  $\beta(t) = \beta_{\min}$  时取得最大值,即:

$$L_{hrpp\_max} = l \cos(\beta_{\min} + \alpha), L_{hrpp\_min} = l \cos(\beta_{\max} + \alpha) \quad (15)$$

由图 1 可知:

$$\beta_{\min} = \begin{cases} \gamma - \theta, & \gamma > \theta \\ \theta - \gamma, & \gamma < \theta \end{cases}, \beta_{\max} = \gamma + \theta \quad (16)$$

平均视线角  $\gamma$  可以通过对弹道的预测得到,半锥角  $\alpha$  可以由先验知识得到。

当  $\gamma > \theta$  时,令:  $\Delta L = L_{hrpp\_max} - L_{hrpp\_min}$ ,  $L_d = L_{hrpp\_max} + L_{hrpp\_min}$ ,则有:

$$\Delta L = 2l \sin(\gamma + \alpha) \sin(\theta) \quad L_d = 2l \cos(\gamma + \alpha) \cos(\theta)$$

以上两式相除得:

$$\frac{\Delta L}{L_d} = \tan(\gamma + \alpha) \tan(\theta)$$

因此有:

$$\hat{\theta} = \arctan\left(\frac{\Delta L}{L_d \tan(\gamma + \alpha)}\right) \quad (17)$$

当  $\gamma < \theta$  时,由式(16)、式(17)可知,  $\theta$  的估计值为:

$$\hat{\theta} = \arctan\left(\frac{\Delta L}{L_d \tan(\gamma)}\right) - \alpha \quad (18)$$

把  $\hat{\theta}$  代入式(15)中任一方程,估计出目标长度:  $\hat{l} = L_{hrpp\_min} / \cos(\hat{\theta} + \gamma + \alpha)$ 。

利用 HRRP 提取进动角和目标真实长度的步骤可归纳如下:

Step 1 利用周期提取方法提取进动周期,按一定采样频率选取 1 个周期的 HRRP;

Step 2 利用 3.1 节的方法提取出投影长度的最大和最小值;

Step 3 计算  $\Delta L$  和  $L_d$ ,利用弹道仿真获得  $\gamma$ ,并根据先验知识将结果代入式(17)(或式(18)),估计出进动角  $\hat{\theta}$ ,如果  $\hat{\theta}$  与  $\gamma$  的关系假设不符,则代入另一式计算;

Step 4 将  $\hat{\theta}$  代入式(15),估计出目标长度  $\hat{l}$ 。

#### 4 仿真实验与分析

设锥体高度  $h=1.7\text{m}$ ,地面半径  $R=0.3\text{m}$ ,进动频率  $f=0.5\text{Hz}$ ,对不同角度下(间隔  $1^\circ$ )的一维距离像,利用 3.1 节的方法和式(9)所示方法( $\eta=0.1$ )在不同视线角条件下的处理结果如图 6 所示。

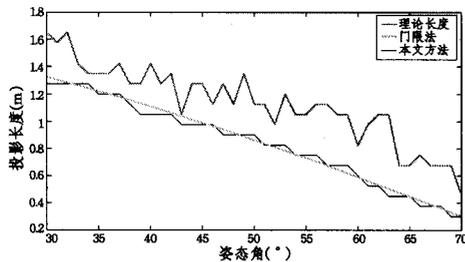


图 6 投影长度提取结果对比

由图 6 可以看出,本文提出的结果要比基于门限法精确得多。下面以此为基础提取目标 5 个周期 HRRP 上两端的散射中心相对位置变化情况(采样频率  $10\text{Hz}$ ),如图 7 所示。

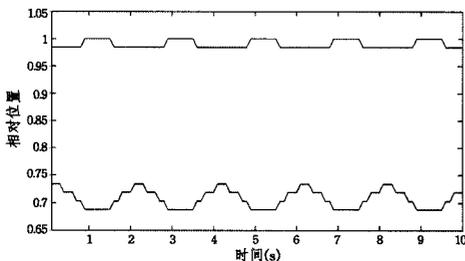


图 7 投影长度提取结果对比

由图 7 可以看出,在短时间内平均视线角的变化对 HRRP 几乎没有影响,此时 HRRP 主要受进动的影响呈现周期性的变化。

下面利用 3.2 节的方法提取进动角和目标的真实长度,提取结果随平均视线角的变化情况如表 1 所列。

表 1 进动角及长度提取结果

$\gamma$ (/度)	30	35	40	45	50	55	60
$L_{hrpp\_max}$ (/m)	1.463	1.378	1.294	1.209	1.088	0.984	0.853
$L_{hrpp\_min}$ (/m)	1.088	0.984	0.853	0.722	0.581	0.450	0.300
$\hat{\theta}$ (/度)	9.941	9.462	9.772	10.02	9.935	9.855	9.903
角度相对误差	0.59%	5.38%	2.29%	0.23%	0.65%	1.45%	0.96%
$\hat{l}$ (/m)	1.690	1.694	1.695	1.710	1.694	1.722	1.711
长度相对误差	0.06%	0.04%	0.03%	0.06%	0.03%	0.13%	0.07%

可以看出,利用本文方法均能较准确地提取出进动角和目标长度,并且对长度的提取角较进动角更加准确。

**结束语** 本文首先分析了目标的进动特性及其一维距离像在不同雷达视线角下的变化规律,提出了一种基于差分算法的目标投影长度提取方法,该方法克服了传统长度提取方法在散射中心周围重复提取的弱点,提高了提取精度。并以此为基础,分析目标的投影长度随进动的变化规律,提出了一种进动角和目标真实长度提取方法。仿真实验表明,以上方法具有较高的精确度。

#### 参考文献

- [1] 廖阔. 基于高分辨距离像的雷达自动目标识别研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012
- [2] 吴杰. 基于高分辨距离像的雷达自动目标识别技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011
- [3] 郭尊华, 李达, 张伯彦. 雷达高距离分辨率一维像目标识别[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(1): 53-60
- [4] 毕莉, 赵锋, 高勋章, 等. 基于高分辨距离像的弹道目标尺寸综合估计方法[J]. 现代雷达, 2009, 31(10): 42-46
- [5] 宁超, 田雨光, 张向阳. 基于雷达一维距离像序列的微动特征提取[J]. 空军预警学院学报, 2013, 27(3): 173-176
- [6] 毕莉, 赵锋, 高勋章, 等. 基于一维像序列的进动目标尺寸估计研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8): 1825-1830
- [7] 艾小锋, 李永桢, 赵锋, 等. 基于多视角一维距离像序列的进动目标特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12): 2846-2851
- [8] 雷腾, 刘进忙, 余付平, 等. 基于时间一距离像的弹道目标进动特征提取新方法[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 73-79
- [9] 朱玉鹏, 王宏强, 黎湘, 等. 基于一维距离像序列的空间弹道目标微动特征提取[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1133-1140
- [10] 金光虎, 朱玉鹏, 高勋章, 等. 基于一维像序列的中段雷达目标进动特征提取[J]. 信号处理, 2009, 25(5): 771-776
- [11] 颜维, 孙文峰, 钱李昌, 等. 基于一维像序列的弹道中段目标进动特征提取[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2): 87-90
- [12] Guo Kai-feng, Lin Yun, Wang Meng, et al. Research of Velocity Compensation Method Based on Range Profile Feature[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 20(2): 81-85
- [13] Zhu F, Zhang X D, Hu Y F. Gabor filter approach to joint feature extraction and target recognition[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System, 2009, 45(1): 17-30
- [14] 孙慧霞, 邱峰, 苏世栋. 基于一维距离像序列的雷达目标微动参数估计[J]. 电讯技术, 2013, 53(4): 389-394
- [15] Mahafza B R. Radar Systems Analysis and Design Using Matlab[M]. USA Florida: CRC Press, 2000
- [16] 孙文峰. 宽带毫米波雷达精确制导信息处理方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1998