

# 基于距离和差值序列的复杂运动 目标微动特征提取

贺 峰,刘承兰,朱国富,黄晓涛,周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 针对由平动和摆动构成的复杂运动目标微动特征提取,提出一种基于距离和差值序列的微动特征提取新方法.该方法首先从复杂运动目标一维距离像估计距离和差值,再利用时间-距离像的距离和差值序列提取目标不同散射点的摆动幅度、摆动周期等微动参数并准确估计出目标平动距离.分析了算法适用条件,开展了仿真实验,仿真结果验证了理论分析的正确性和算法的有效性.该特征提取方法可推广应用于一般平动与旋转等其他周期性运动构成的复杂运动目标微动特征提取.

**关键词:** 距离像;和差值序列;微动;特征提取

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0422-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.002

## Micro-Motion Signature Extraction of Targets with Complex Motions Based on Summation and Difference Sequence of Ranges

HE Feng, LIU Cheng-lan, ZHU Guo-fu, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** A novel method based on summation and difference sequence of ranges is proposed in order to extract micro-motion signatures of targets with complex motions which are composed of translation and vibration. The method estimates summation and difference of ranges from one dimensional range profile and obtains summation and difference sequence of ranges from time-range profiles of targets. Vibration amplitudes and vibration periods of different scatterers are achieved and translation ranges of targets are exactly acquired from summation and difference sequence. The restrictive conditions of the method were analyzed and simulation experiments were carried out. Simulation results validate the theoretical analysis and the signature extraction method. The method discussed in the paper can be extended to analyze other targets with general translation and other periodic motions.

**Key words:** range profile; summation and difference sequence; micro-motion; signature extraction

### 1 引言

目标的微动会对电磁波产生多普勒调制、回波功率调制以及成像特征调制等作用,微动目标雷达回波中蕴涵的微动特性信息反映了目标的几何结构和运动特征,提取目标的微动特征为雷达目标特征抽取和目标识别提供了新的途径<sup>[1]</sup>.利用目标时间-频率像提取微动参数是常用的微动特征提取思路<sup>[2]</sup>,该思路通常采用时频分析<sup>[3]</sup>、独立分量分析<sup>[4]</sup>、小波变换<sup>[5]</sup>等技术从目标时频像中提取微动特征,仅利用了目标瞬时频率特征,获取的距离信息有限,事实上是一种窄带雷达信号处理方式;利用宽带、超宽带雷达获得目标高分辨距离像并从

中提取目标距离、瞬时运动(平动和微动)特征,成为研究目标微动特征提取的新途径.文献[6]从时间-距离像直接提取目标微动特征,文献[7~9]则分别利用Hough变换、扩展的Hough变换以及逆Radon变换将目标的时间-距离像转化为其他信号域表示形式,从而提取目标微动特征,上述思路均要求在雷达观测时间内目标运动可近似为旋转和振动等标准的微动形式,当目标存在明显平动时,需先进行平动补偿操作,而对于复杂运动目标的精确平动补偿通常是较为困难的,因此上述方法性能将明显下降,甚至无法应用.

实际目标运动往往是由多种运动形式构成的复杂运动,如人体目标行进运动可近似为平动和摆动等运动

形式构成的复杂运动<sup>[10]</sup>,研究复杂运动目标微动特征提取技术具有重要的理论和实际意义.文献[11]给出方法对等臂旋转目标参数估计效果较好,但无法估计出不等臂旋转目标旋转半径等微动参数.文献[12]提出一种基于窄带测距信息的空间目标微动特征检测与估计方法,对单散射点目标(窄带应用)较为有效,但不适用于多散射点目标(宽带应用).文献[13]提出一种利用回波多普勒峰值差值序列来估计目标平动的方法,实现简单,利用距离像与多普勒像等效的思想<sup>[7]</sup>,可将该方法应用于时间-距离像,但该方法需要事先估计微动周期参数,增加了处理复杂性,另外需要对平动规律进行适当假设,不具有一般性,因此应用受到限制.

综合考虑上述情况,本文研究基于雷达时间-距离像的复杂运动目标微动特征提取方法.建立由平动和摆动构成的复杂运动目标频率步进连续波(Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW)雷达回波模型,并合成目标一维距离像,针对复杂运动目标微动特征提取,提出基于距离和差值序列的微动特征提取方法,利用距离差值序列估计摆动周期,利用距离和差值序列估计不同散射点的摆动幅度和目标平动距离,该方法可有效提取出复杂运动目标微动参数及平动距离.仿真结果验证了理论分析的正确性和微动特征提取算法的有效性.

## 2 复杂运动目标雷达回波分析

通常目标雷达回波可由多个强散射点的雷达回波来构成<sup>[14]</sup>,假设每个散射点做平动和摆动构成的复杂运动,平动为匀速直线运动,速度大小等于  $v_0$ ,摆动为钟摆简谐振动,所有散射点具有共同的摆动轴顶点和运动平面(由摆动对称轴和平动方向确定的平面).雷达与运动目标的几何关系如图 1 所示,目标运动平面与雷达视线方向夹角为  $\alpha$ ,初始时刻目标与雷达水平距离为  $R_0$ ,摆动对称轴与雷达坐标系  $Z$  轴平行,  $t$  时刻摆动角可以表示为  $\theta_i(t) = \theta_{\max} \sin(\omega t + \phi_i)$ ,  $\theta_{\max}$  为摆动角振幅,不妨设  $\theta_{\max} < \pi/2$ ,  $\omega$  为摆动角频率,  $\phi_i$  为摆动角初相,  $\phi_i$  决定散射点初始时刻摆动位置,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $I$  为散射点数目.  $t$  时刻距摆动轴顶点为  $l_i$  的散射点目标

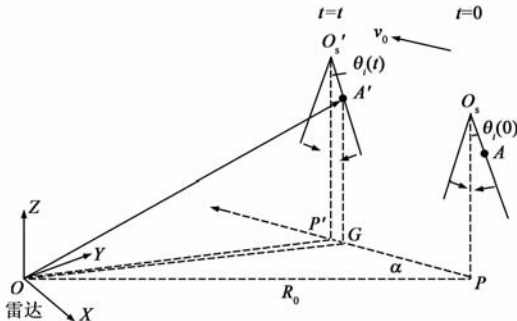


图1 复杂运动目标几何关系图

$A$  与雷达径向距离  $R_i(t)$  为<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} R_i(t) &= (R_0^2 + (v_0 t - l_i \sin \theta_i(t))^2 + |z_s - l_i \cos \theta_i(t)|^2 \\ &\quad - 2R_0(v_0 t - l_i \sin \theta_i(t)) \cos \alpha)^{1/2} \\ &\approx (R_0^2 + (v_0 t - l_i \sin \theta_i(t))^2 \\ &\quad - 2R_0(v_0 t - l_i \sin \theta_i(t)) \cos \alpha)^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $z_s$  为摆动轴顶点( $O_s$  和  $O'_s$ ) 在雷达坐标系内  $Z$  轴坐标值. 式(1)的近似, 要求雷达对目标观测仰角近似为 0, 即  $R_{CA} \ll R_{OC}$ , 上述条件在人体目标探测中一般可以满足. 由式(1)可知,  $R_i(t)$  与  $R_0$ 、 $v_0$ 、 $l_i$ 、 $\theta_i(t)$  及  $\alpha$  有关, 为了便于分析, 不妨设  $\alpha = 0$ , 从而得到

$$R_i(t) \approx |R_0 - v_0 t + l_i \sin \theta_i(t)| = R_0 - v_0 t + l_i \sin \theta_i(t) \quad (2)$$

此时, 在雷达观测时间内,  $R_0 > v_0 t - l_i \sin \theta_i(t)$ .

SFCW 信号不仅具有频率步进信号以宽带信号方式工作、以窄带信号方式采样和处理的优点, 而且具有连续波信号无近距离盲区的优势, 因此比较适合于近距离目标(如人体目标)探测的应用. 假设 SFCW 雷达单个频点的发射时宽为  $T$ , 载频初始频率为  $f_0$ , 频率步进增量为  $\Delta f$ , 频率步进数为  $N$ , 采样间隔为  $T$ , 则相对雷达径向距离为  $R_i(t)$  处点目标零中频雷达回波可表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} s_i(m, n) &= \rho_i \exp\{-j4\pi(f_0 + n\Delta f) \\ &\quad \cdot (R_0 - v_0(m-1)NT - v_0 nT)/c\} \\ &\quad \cdot \exp\{-j4\pi(f_0 + n\Delta f)l_i \\ &\quad \cdot \sin \theta_i((m-1)NT + nT)/c\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\rho_i$  为目标后向散射系数, 假定  $\rho_i$  在雷达观测时间内保持恒定不变,  $\exp\{\cdot\}$  为指数运算,  $c$  为光速,  $(m-1)NT + nT$  为  $t$  的离散采样值,  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  为采样帧数,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$  表示第  $m$  帧内第  $n$  个调制周期.

上式即为做复杂运动点目标雷达回波表达式. 当  $\omega NT$  很小时, 有  $\cos(\omega NT) \approx 1$ ,  $\sin(\omega NT) \approx \omega NT$ , 对式(3)进一步化简并进行快速傅立叶反变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT), 得到<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} S_i(m, k) &= \text{IFFT}[s_i(m, n)] \\ &= \rho_i \exp\{-j4\pi f_0(R_0 - v_0(m-1)NT \\ &\quad + l_i \sin \theta_{(m,i)})/c\} \\ &\quad \cdot \exp\{-j2\pi(N-1)L_i(m, k)\} \\ &\quad \cdot \sin[2\pi N L_i(m, k)] / (N \sin[2\pi L_i(m, k)]) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\theta_{(m,i)} = \theta_{\max} \sin(\omega(m-1)NT + \phi_i)$  (5)

$$\begin{aligned} L_i(m, k) &= (\Delta f(R_0 - v_0(m-1)NT + l_i \sin \theta_{(m,i)}) \\ &\quad - f_0 T(v_0 - \omega l_i \theta_{\max} \delta_{(m,i)} \cos \theta_{(m,i)})/c \\ &\quad - k/(2N) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\delta_{(m,i)} = \cos(\omega(m-1)NT + \phi_i) \quad (7)$$

$S_i(m, k)$ 表示第  $m$  帧信号对应的复振幅一维距离像,  $|S_i(m, k)|$ 即为第  $m$  帧信号的实振幅一维距离像, 简称为一维距离像<sup>[16]</sup>, 若不作特殊说明, 本文的一维距离像均是指实振幅一维距离像,  $k = 0, 1, \dots, N - 1$ . 因  $|S_i(m, k)|$ 在  $l_i(m, k) = k_m$  时取得最大值, 其中  $k_m$  取整数, 则有

$$\begin{aligned} R_i(m) &= k_m \Delta R + k \rho_r \\ &= R_0 - v_0 T((m-1)N + f_0/\Delta f) \\ &\quad + l_i(\sin\theta_{(m,i)} + f_0 T \omega_{\max} \delta_{(m,i)} \cos\theta_{(m,i)}/\Delta f) \\ &= R_0 - v_0 T((m-1)N + f_0/\Delta f) \\ &\quad + \beta_{(m,i)} l_i \sin(\theta_{(m,i)} + \gamma_{(m,i)}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $R_i(m)$ 是点目标在距离像中的位置函数, 随  $m$  而变化,  $k$  为距离像最大幅值对应的谱线数,  $\Delta R = c/(2\Delta f)$ 为最大不模糊距离,  $\rho_r = c/(2\Delta fN)$ 为距离分辨率,  $\beta_{(m,i)} = (1 + (f_0 T \omega_{\max} \delta_{(m,i)}/\Delta f)^2)^{1/2}$ 为幅度因子,  $\gamma_{(m,i)} = \tan^{-1}(f_0 T \omega_{\max} \delta_{(m,i)}/\Delta f)$ .

由式(8)得到的点目标在距离像中的位置函数与式(2)所示的径向距离具有十分相似的表达式, 反映了点目标相对雷达径向方向的运动规律. 由式(8)易知, 点目标位置函数由初始距离分量  $R_0$ , 平动距离分量  $-v_0 T((m-1)N + f_0/\Delta f)$  和摆动距离分量  $\beta_{(m,i)} l_i \sin(\theta_{(m,i)} + \gamma_{(m,i)})$  等3部分组成, 前两部分反映了目标整体的平动规律, 而第3部分则反映了目标的摆动规律. 不同散射点目标的位置函数具有相同的平动规律, 而具有不同的摆动规律, 这与目标运动模型的假设相一致. 由于三角函数的周期性, 当  $k_m$  取不同整数时会造成一维距离像的距离模糊. 若不考虑目标距离发生折叠的情况, 则目标时延满足:  $0 < \tau_i(t) < T$ , 从而目标距离满足:  $0 < R_i(t) < cT/2$ , 令  $R_i(m) = R_i(t)$ 即可解距离模糊. 若目标距离发生折叠, 则采取适当的目标抽取算法可解距离模糊, 具体可参见文献[17]. 这里为方便讨论, 仅考虑前一种情况. 比较式(8)与文献[6]对旋转运动目标的位置函数的推导可知, 目标微动引起的位置函数均呈现正弦规律变化, 在角度调制方面, 前者是非线性调制, 而后者是均匀线性调制, 因此本文讨论的复杂运动目标模型具有一般性.

### 3 基于距离和差值序列的微动特征提取

#### 3.1 距离和差值序列变化特性

由式(8)可知, 不同散射点位置函数的平动分量完全相同, 摆动分量均呈正弦函数变化, 但摆动振幅和摆动初相角可能不同. 实际人体目标常常由这样两类散射点构成, 其摆动角初相差  $\pi$ , 如行进人体目标两臂摆动和腿部运动<sup>[10]</sup>, 不妨设一部分散射点的初相为  $\phi_{i_1} = \phi_0, 0 \leq \phi_0 < 2\pi, i_1 = 1, \dots, I_1$ , 另一部分散射点的初相

为  $\phi_{i_2} = \phi_0 + \pi, i_2 = 1, \dots, I_2, I_1 + I_2 = I$ , 则目标距离和差值序列可表示为

$$\begin{aligned} \Sigma R_i(m) &= \sum_{i_1} R_{i_1}(m) + \sum_{i_2} R_{i_2}(m) \\ &= I(R_0 - v_0 T((m-1)N + f_0/\Delta f)) \\ &\quad + A_{\Sigma} \beta_m \sin(\theta_m + \gamma_m) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_i(m) &= \sum_{i_1} R_{i_1}(m) - \sum_{i_2} R_{i_2}(m) \\ &= A_{\Delta} \beta_m \sin(\theta_m + \gamma_m) \end{aligned} \quad (10)$$

其中  $A_{\Sigma} = \sum_{i_1} l_{i_1} - \sum_{i_2} l_{i_2}, A_{\Delta} = \sum_{i_1} l_{i_1} + \sum_{i_2} l_{i_2}$ ,

$$\beta_m = (1 + (f_0 T \omega_{\max} \delta_m/\Delta f)^2)^{1/2},$$

$$\theta_m = \theta_{\max} \sin(\omega(m-1)NT + \phi_0),$$

$$\gamma_m = \tan^{-1}(f_0 T \omega_{\max} \delta_m/\Delta f),$$

$$\delta_m = \cos(\omega(m-1)NT + \phi_0).$$

式(9)所示的距离和值序列不仅含有目标的摆动分量, 而且含有目标的平动分量, 摆动分量的幅度是两类散射点的幅度和之差; 而式(10)所示的距离差值序列仅含有目标的摆动分量, 是标准的正弦信号形式, 摆动周期是正弦信号周期, 摆动幅度是所有散射点的幅度和. 考虑到实际中通过目标距离像难以准确区分各散射点的距离, 因而很难获得式(10)所示的距离差值序列. 若仅考虑摆动幅度最大的散射点, 且忽略  $f_0 T \omega_{\max} \delta_m/\Delta f$  的影响, 则式(9)和(10)变成

$$\begin{aligned} \Sigma R_{\text{ext}}(m) &\approx 2(R_0 - v_0 T((m-1)N + f_0/\Delta f)) \\ &\quad + A_{\Sigma \text{ext}} \sin\theta_m \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta R_{\text{ext}}(m) \approx A_{\Delta \text{ext}} \sin\theta_m \quad (12)$$

其中  $\Sigma R_{\text{ext}}(m)$  和  $\Delta R_{\text{ext}}(m)$  分别表示具有最大摆动幅度散射点的距离和、差值序列,  $A_{\Sigma \text{ext}} = l_{i_1 \text{max}} - l_{i_2 \text{max}}, A_{\Delta \text{ext}} = l_{i_1 \text{max}} + l_{i_2 \text{max}}, l_{i_1 \text{max}} = \max_{i_1} \{l_{i_1}\}, l_{i_2 \text{max}} = \max_{i_2} \{l_{i_2}\}$ . 对式(11)和(12)联立数值求解, 可估计出微动参数  $l_{i_1 \text{max}} \sin\theta_{\max}, l_{i_2 \text{max}} \sin\theta_{\max}, \omega$  及平动分量大小. 因此, 复杂运动目标微动特征提取问题就转化为距离和差值序列构成的方程组数值求解及参数估计问题. 注意到, 若  $l_{i_1 \text{max}} = l_{i_2 \text{max}}$ , 则从式(12)可直接解出微动参数, 从式(11)可直接解出平动距离分量.

#### 3.2 微动特征提取

由式(12)估计  $T_{\text{vib}}$  可用自相关函数法、平均幅度差函数法以及频谱分析法等常用方法, 为获得时间变量 (即帧数  $m$ ) 信息, 本文采用另一种思路: 利用式(12)周期性搜索  $|\Delta R_{\text{ext}}(m)| = 0$  时的  $m$  值构成帧数序列  $\{m_f\}, f = 1, 2, \dots, F, F$  为满足  $|\Delta R_{\text{ext}}(m)| = 0$  时  $m$  值个数, 为得到  $T_{\text{vib}}$  正确估计值, 应满足:  $F \geq 2$ . 因此  $T_{\text{vib}} = 2(m_F - m_1)/(F - 1)$ .

利用  $\{m_f\}$ , 可得平动分量采样值  $R_{\Sigma \text{tran}}(m_f) \approx$

$\sum R_{\text{ext}}(m_f)$ , 该采样值只有  $F$  个元素, 对  $R_{\sum \text{tran}}(m_f)$  进行三次样条插值, 得  $R_{\sum \text{tran}}(m) = \text{spline} \{R_{\sum \text{tran}}(m_f)\}$ , 其中  $\text{spline}\{\cdot\}$  表示三次样条插值函数. 将  $R_{\sum \text{tran}}(m)$  从式 (11) 中除去可得距离和值序列的摆动分量  $R_{\sum \text{vib}}(m)$ :

$$R_{\sum \text{vib}}(m) = \sum R_{\text{ext}}(m) - R_{\sum \text{tran}}(m) \approx A_{\sum \text{ext}} \sin \theta_m \quad (13)$$

上式极大值为  $A_{\sum \text{ext}} \sin \theta_{\max}$ , 而式 (12) 极大值为  $A_{\Delta \text{ext}} \sin \theta_{\max}$ , 从而可求得微动参数  $l_{i_1 \max} \sin \theta_{\max}$ 、 $l_{i_2 \max} \sin \theta_{\max}$ , 分别称为两类散射点的摆动幅度. 若已知摆动角振幅  $\theta_{\max}$ , 则可进一步估计出摆动位置  $l_{i_1 \max}$  和  $l_{i_2 \max}$ .

综上所述, 基于距离和差值序列的微动特征提取步骤可归纳如下:

**Step 1** 对帧内回波信号进行 IFFT 并取模, 获取雷达回波信号一维距离像, 即  $|S(m, k)| = |\text{IFFT}(s(m, n))|$ , 其中  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

**Step 2** 利用幅度阈值检测法估计距离像中信号分量成份, 首先搜索距离像幅度最大值, 再根据设定的阈值获取回波距离像中信号分量成份, 即

$$S_1(m, k) = \{ |S(m, k)| \mid |S(m, k)| \geq \eta \cdot \max_k |S(m, k)| \}$$

其中  $\max(\cdot)$  表示对  $k$  值搜索求取序列最大值,  $\eta$  为幅度阈值因子, 取值范围为  $\eta \in [0, 1]$ . 为了能够检测到具有不同强度的散射点目标,  $\eta$  值不能取得过大. 因此, 满足上式的元素常常会比预期值要多, 且距离宗量  $k$  是连续变化的, 取连续变化  $k$  值元素的中值, 以提取信号分量.

**Step 3** 利用式 (8) 计算目标距离并解距离模糊, 得  $R(m, k)$ , 对  $k$  值进行搜索判断, 获取运动目标距离极大值序列  $R_{\max}(m)$  和极小值序列  $R_{\min}(m)$ , 即  $R_{\max}(m) = \text{maximum}_k \{R(m, k)\}$ ,  $R_{\min}(m) = \text{minimum}_k \{R(m, k)\}$ , 其中  $\text{maximum}(\cdot)$  和  $\text{minimum}(\cdot)$  分别表示对  $k$  值搜索求取序列极大值和极小值.

**Step 4** 获取目标距离和差值序列  $\sum R_{\text{ext}}(m)$  和  $\Delta R_{\text{ext}}(m)$ , 搜索  $|\Delta R_{\text{ext}}(m)| = 0$  时的  $m$  值构成帧数序列  $\{m_f\}$ , 获取平动分量  $R_{\sum \text{tran}}(m_f)$ , 搜索  $\Delta R_{\text{ext}}(m)$  极值  $A_{\Delta \text{ext}} \sin \theta_{\max}$ .

**Step 5** 将得到的  $R_{\sum \text{tran}}(m_f)$  进行三次样条插值, 得  $M$  点数据  $R_{\sum \text{tran}}(m)$ , 计算距离和值序列摆动分量  $R_{\sum \text{vib}}(m)$ , 搜索  $R_{\sum \text{vib}}(m)$  极值  $A_{\sum \text{ext}} \sin \theta_{\max}$ .

**Step 6** 利用  $A_{\Delta \text{ext}} \sin \theta_{\max}$  和  $A_{\sum \text{ext}} \sin \theta_{\max}$  解算摆动幅度  $l_{i_1 \max} \sin \theta_{\max}$ 、 $l_{i_2 \max} \sin \theta_{\max}$ , 利用  $\{m_f\}$  解算摆动周期  $T_{\text{vib}}$ .

上述过程可用如图 2 所示的流程图表示.

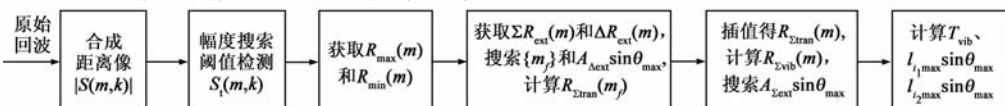


图2 目标微动特征提取处理流程

### 3.3 算法适用性分析

第 3.1 节的讨论基于如下假设:  $f_0 T \omega \theta_{\max} \delta_m / \Delta f \ll 1$ , 从而  $f_0 T \omega \theta_{\max} / \Delta f \ll 1$ , 于是有:  $\omega \theta_{\max} \ll \Delta f / (f_0 T)$ , 若  $f_0 = 2\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 1\text{MHz}$ ,  $T = 1\mu\text{s}$ , 则有  $\omega \theta_{\max} \ll 500$ , 该条件在人体目标探测中通常可以满足.

根据第 3.2 节的理论分析可知, 利用距离和差值序列估计目标微动周期要求雷达对目标连续观测时间应至少大于目标微动周期, 即  $t_s \geq T_{\text{vib}}$ ,  $t_s$  为连续采样时间. 为了有效利用目标距离像信息, 在连续采样时间内目标径向方向平动距离范围应不超出最大不模糊距离. 若目标径向方向平动距离范围为  $\Delta R_r$ , 初始时刻目标位置为  $R_{i0}$  ( $0 < R_{i0} < \Delta R$ ), 径向方向平均平动速度为  $v_{\text{rave}}$ , 且定义径向逼近雷达方向为正, 径向远离雷达方向为负, 则有:  $R_{i0} + \Delta R_r \leq \Delta R$  ( $v_{\text{rave}} < 0$ ) 或者  $\Delta R_r \leq R_{i0}$  ( $v_{\text{rave}} \geq 0$ ). 考虑到  $\Delta R_r = |v_{\text{rave}}| \cdot t_s$ , 因此目标的运动参数满足如下关系式:

$$|v_{\text{rave}}| \leq (\Delta R - R_{i0}) / T_{\text{vib}} \text{ 且 } T_{\text{vib}} \leq t_s \leq (\Delta R - R_{i0}) / |v_{\text{rave}}|, v_{\text{rave}} < 0 \quad (14)$$

$$|v_{\text{rave}}| \leq R_{i0} / T_{\text{vib}} \text{ 且 } T_{\text{vib}} \leq t_s \leq R_{i0} / |v_{\text{rave}}|, v_{\text{rave}} \geq 0 \quad (15)$$

当  $v_{\text{rave}} \rightarrow 0\text{m/s}$  时,  $(\Delta R - R_{i0}) / |v_{\text{rave}}| \rightarrow \infty$ ,  $R_{i0} / |v_{\text{rave}}| \rightarrow \infty$ , 因此当  $v_{\text{rave}} = 0\text{m/s}$  时, 式 (14) 和 (15) 仍有意义.

基于距离和差值序列的摆动特征提取算法是由匀速平动和摆动构成的复杂运动模型得出的, 但算法的处理过程没有利用匀速平动的先验信息, 因而亦适用于由更一般的平动形式和摆动构成的复杂运动.

## 4 仿真实验与分析

### 4.1 距离和差值序列估计性能验证

仿真参数如下:  $R_0 = 100\text{m}$ ,  $z_s = 0.5\text{m}$ ,  $\theta_{\max} = 14.5^\circ$ ,  $I_1 = I_2 = 1$ ,  $l_i = \{0.8\text{m}, 0.6\text{m}\}$ ,  $\rho_i = \{1, 1\}$ ,  $v_0 = 1.5\text{m/s}$ ,  $\alpha = 0$ ,  $f_0 = 2\text{GHz}$ ,  $\Delta f = 1\text{MHz}$ ,  $N = 2048$ ,  $T_{\text{vib}} = 1\text{s}$ , 为了减少数据量, 对采样帧数进行 10 倍抽取, 此时帧数维采样周期变为  $10NT = 0.02048\text{s}$ , 设回波中含有加性复高斯白噪声, 基于 Pearson 积矩相关系数 (Pearson Product Moment Correlation Coefficient, PPMCC)<sup>[18]</sup> 最大和均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 最小准则, 利用 Monte Carlo 方法分析幅度阈值因子  $\eta$  变化对距离和差值序列估计的影响. 研究表明, 在信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 高于  $-15\text{dB}$  情况下, 当  $\eta = 0.5$  时可实现对距离和差值序列的较优估计, 而在 SNR 低于  $-15\text{dB}$  时, 随着 SNR 的不断减小, 信号估计误差不断增大, 检

估计, 而在 SNR 低于  $-15\text{dB}$  时, 随着 SNR 的不断减小, 信号估计误差不断增大, 检

测概率不断降低,即使选用最优阈值亦对信号估计性能改善不大,因此本文仿真假定  $\eta = 0.5$ .

设 SNR 为 10dB,某次仿真得到的复杂运动目标时间-距离像及距离序列如图 3 所示,其中图 3(a)为目标时间-距离像,图 3(b)为距离和值序列,图 3(c)为距离差值序列,图 3(d)为平动距离序列.算法估计的差值序列实际上是差值序列的绝对值,为便于比较,给出的理论计算结果同样取了绝对值.算法估计的平动距离序列实际上是式(11)中的平动距离分量,即  $R_{\Sigma \text{tran}}(m)$ ,它是目标实际平动距离分量的 2 倍.图 3(a)所示结果表明,匀速平动使得目标的时间-距离像整体上呈线性变化,而摆动使得不同散射点的时间-距离像相互交织.经计算,图 3(b)~图 3(d)中距离和值序列、距离差值序列和平动距离序列估计值的 PPMCC 和 RMSE 见表 1.三种距离序列估计的 PPMCC 均近似等于或接近于 1,而参数估计的 RMSE 数值均较小,因此利用本文算法提取的距离序列与理论计算值吻合较好,从而验证了基于幅度阈值检测提取复杂运动目标距离序列的有效性.

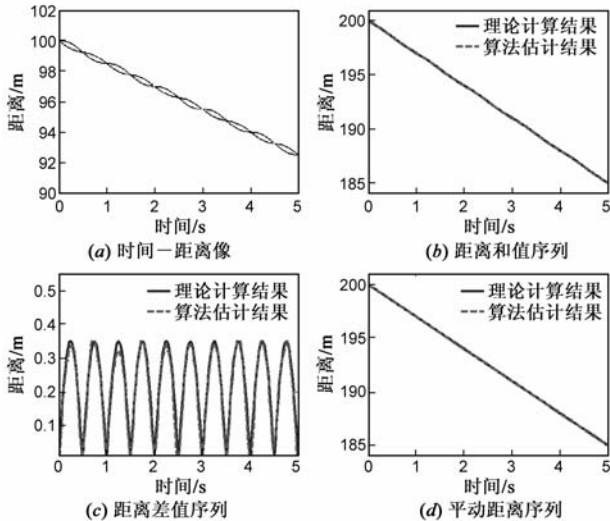


图3 复杂运动目标时间-距离像及距离序列

表1 目标距离序列估计的 PPMCC 和 RMSE

参数	PPMCC	RMSE/m
$\Sigma R_{\text{ext}}$	1.0000	0.0181
$\Delta R_{\text{ext}}$	0.9901	0.0198
$R_{\Sigma \text{tran}}$	1.0000	0.0258

利用 Monte Carlo 方法分析 SNR 对距离序列估计性能影响, Monte Carlo 仿真次数为 100, 结果如图 4 所示, 其中图 4(a)为距离序列估计的 PPMCC 随 SNR 变化曲线, 图 4(b)为距离序列估计的 RMSE 随 SNR 变化曲线. 图 4 所示结果表明, 当 SNR 高于 -15dB 时距离序列估计性能逐渐趋于稳定, 而在低于 -15dB 时, 性能明显下降. 当  $\text{SNR} \geq -15\text{dB}$  时, 平动距离序列估计的 RMSE 稳

定在 -15.88dB(0.0258m)左右, 因此利用三次样条插值获取的平动距离序列估计具有较高的精度; 另一方面, 和值序列估计性能略优于差值序列估计性能, 即使信噪比很高时亦如此, 这说明和值序列平动分量估计误差较小, 和差值序列中摆动分量估计误差是主要的误差来源. 如式(11)和(12)所示, 和差值序列中摆动分量变化规律相同, 幅度相异, 前者摆动幅度小于后者摆动幅度, 因而前者摆动分量估计误差小于后者摆动分量估计误差, 仿真结果验证了理论分析的结论.

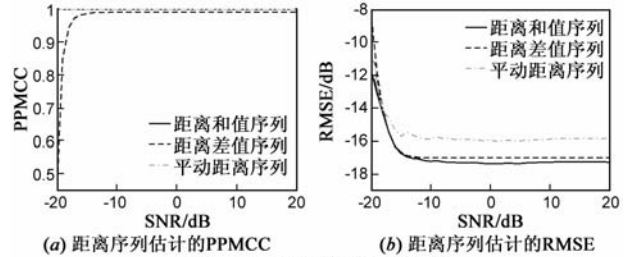


图4 目标距离序列估计性能

## 4.2 微动特征提取算法性能验证

采用本文算法对距离和差值序列进行处理, 得到目标摆动参数估计结果, 见表 2. 参数估计结果取为 100 次 Monte Carlo 仿真平均值, 估计误差取为估计值与真实值之差的绝对值, 其中  $l_{1\text{vib}} = l_{i,\text{max}} \sin \theta_{\text{max}}$ ,  $l_{2\text{vib}} = l_{i,\text{max}} \sin \theta_{\text{max}}$ . 结果表明,  $T_{\text{vib}}$  与  $l_{\text{vib}}$  估计结果均十分逼近于其真实值,  $T_{\text{vib}}$  估计相对误差小于 2%, 绝对误差与帧数维采样周期相当;  $l_{\text{vib}}$  估计相对误差小于 3%, 绝对误差远小于距离分辨率 ( $\rho_r = 0.0732\text{m}$ ). 仿真结果表明本文提出的微动特征提取算法是合理有效的.

表2 目标摆动参数估计结果

参数	理论值	估计值	估计误差
$T_{\text{vib}}/\text{s}$	1	0.9830	0.0170
$l_{1\text{vib}}/\text{m}$	0.2003	0.1953	0.0050
$l_{2\text{vib}}/\text{m}$	0.1502	0.1459	0.0043

利用 Monte Carlo 方法分析 SNR 对微动参数估计的影响. 仿真参数如前, 仿真结果如图 5 所示. 结果表明, SNR 较低 ( $\text{SNR} < -10\text{dB}$ ) 时,  $T_{\text{vib}}$  和  $l_{\text{vib}}$  估计的 RMSE 随 SNR 的减小而急剧恶化, 此时目标的距离像被噪声严重污染, 无法正确提取目标摆动参数. 当 SNR 较高 (SNR

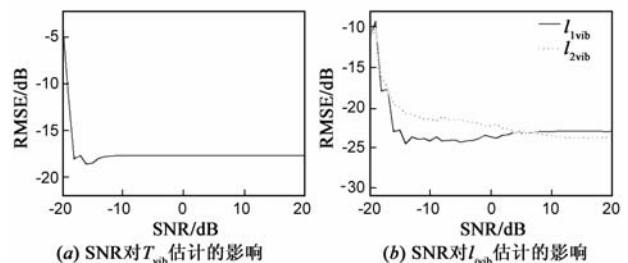


图5 SNR对参数估计的影响

$\geq -10\text{dB}$ 时,  $T_{\text{vib}}$ 和  $l_{\text{vib}}$ 估计的 RMSE 迅速减小并趋于稳定.  $T_{\text{vib}}$ 估计的 RMSE 稳定在  $-17.71\text{dB}$ ( $0.0170\text{s}$ )左右;而  $l_{1\text{vib}}$ 和  $l_{2\text{vib}}$ 估计的 RMSE 分别稳定于  $-22.98\text{dB}$ ( $0.0050\text{m}$ )左右和  $-23.77\text{dB}$ ( $0.0042\text{m}$ )左右,当 SNR 高于  $6\text{dB}$ 、噪声影响较小时,  $l_{2\text{vib}}$ 估计的 RMSE 低于  $l_{1\text{vib}}$ 估计的 RMSE. 上述结果的理论解释如下:式(11)和(12)所示的距离和、差值序列中摆动分量变化规律相同、幅度相异,因此两者摆动分量估计误差符号相同,由于  $l_{2\text{vib}} = (A_{\Delta\text{ext}}\sin\theta_{\text{max}} - A_{\Sigma\text{ext}}\sin\theta_{\text{max}})/2$ ,所以部分估计误差抵消,  $l_{2\text{vib}}$ 估计误差小于  $l_{1\text{vib}}$ 估计误差.

### 4.3 雷达观测角度对算法性能影响

设  $\alpha = \{0, \pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12, \pi/2, 7\pi/12, 2\pi/3, 3\pi/4, 5\pi/6, 11\pi/12, \pi\}$ ,其他参数与第 4.1 节相同,利用本文算法对目标摆动参数进行提取,所得结果见表 3. 表 3 给出结果均为经过 100 次 Monte Carlo 仿真的平均值. 结果表明,在大部分角度内  $T_{\text{vib}}$ 估计均保持比较高的精度,但在  $\alpha = 5\pi/12, \pi/2, 7\pi/12$  时,  $T_{\text{vib}}$ 估计结果严重偏离其真实值,此时目标近似或完全垂直于雷达视线方向运动,在有限观测时间内,摆动引起的径向

表 3 不同  $\alpha$  时目标摆动参数估计结果

参数	不同 $\alpha$ 时参数估计结果												
	0	$\pi/12$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$5\pi/12$	$\pi/2$	$7\pi/12$	$2\pi/3$	$3\pi/4$	$5\pi/6$	$11\pi/12$	$\pi$
$T_{\text{vib}}/\text{s}$	0.9830	0.9852	0.9830	0.9988	0.9848	0.7099	2.5954	0.5616	0.9866	0.9928	0.9958	0.9856	0.9933
$l_{1\text{vib}}/\text{m}$	0.1954	0.1950	0.1808	0.1411	0.0824	0.0474	0.0123	0.0478	0.0981	0.1449	0.1781	0.1942	0.1940
$l_{2\text{vib}}/\text{m}$	0.1458	0.1361	0.1287	0.0931	0.0788	0.0362	0.0122	0.0171	0.0821	0.0983	0.1266	0.1383	0.1476

## 5 结束语

人体目标行进运动可抽象为平动和摆动构成的复杂运动,从雷达回波中提取出目标的平动距离和摆动特征有助于目标的精确识别,是目前人体目标探测领域的研究热点. 本文提出基于目标距离和差值序列的微动特征提取新方法,该方法利用目标距离差值序列估计摆动周期,利用目标距离和差值序列估计不同散射点的摆动幅度和目标平动距离. 仿真结果验证了方法的有效性并取得如下结论:(1)当信噪比高于  $-10\text{dB}$ 时,本文提出方法可有效估计复杂运动目标的摆动周期和摆动幅度等微动参数,并准确估计出目标平动距离;(2)当目标运动平面与雷达视线方向存在一定夹角时,算法所得摆动幅度结果是对幅度参数在雷达视线方向投影值的估计,因此受方向性影响较大;算法所得摆动周期结果受方向性影响较小,但目标在观测时间内近似垂直于雷达视线方向运动时,无法获得摆动周期的有效估计;(3)虽然本文算法的推导是在目标匀速平动的假设下得到的,但是算法处理过程并没有利用匀速平动的信息,因此本文算法亦适用于匀加速平动等一般性平动和摆动构成的复杂运动微动特征提取;另外旋转运动具有与摆动类似的运动规律,可看作是

距离变化小于雷达距离分辨率,通过距离和差值序列无法有效提取摆动周期.  $\alpha = 0$  或  $\alpha = \pi$  附近  $l_{\text{vib}}$ 估计达到最大值,  $\alpha$  值逐渐逼近  $\pi/2$  时距离和差值序列中摆动分量在雷达径向方向的幅度逐渐变小,  $l_{\text{vib}}$ 估计值逐渐减小,并在  $\alpha = \pi/2$  时接近于 0.

为进一步研究  $l_{\text{vib}}$ 估计与  $\alpha$  值之间的关系,将表 3 所示结果绘制成  $l_{\text{vib}}$ 估计随  $\alpha$  值变化曲线,如图 6 所示. 结果表明,  $l_{\text{vib}}$ 估计值近似等于  $l_{\text{vib}}$ 真实值与  $|\cos\alpha|$  的乘积,即通过雷达观测得到的  $l_{\text{vib}}$ 估计值是对  $l_{\text{vib}}$ 真实值在雷达视线方向上投影值  $l_{\text{vib}}|\cos\alpha|$  的有效估计,估计误差小于  $\rho_r/2$ . 因此为了准确估计  $l_{\text{vib}}$ ,应尽量使雷达视线方向与目标运动方向平行,而当雷达视线方向与目标运动方向垂直时,无法有效估计目标摆动参数.

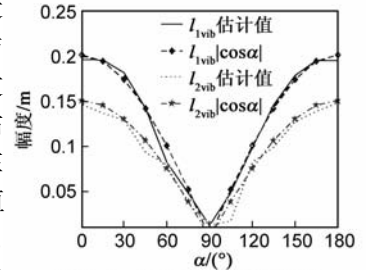


图 6  $l_{\text{vib}}$ 估计随  $\alpha$  值变化曲线

摆动的一种特殊情况,因此本文所得结论具有一定的普适性,本文算法可扩展应用于不等臂旋转等其他周期性运动与平动构成的复杂运动目标微动特征提取.

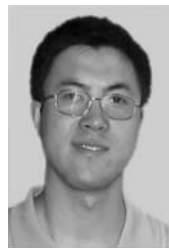
应当指出,本文的研究结论是在点散射模型(非起伏目标)和均匀背景环境(恒定信噪比的复高斯白噪声)的条件下取得的.但在实际应用(如人体目标探测)中,目标的 RCS 往往起伏不定,背景环境复杂多变,此时获得的目标距离像质量会有不同程度的下降,从而基于距离和差值序列的特征提取性能会有一定程度的降低.分析并解决实际因素对微动特征提取算法的影响是今后的研究重点,有望取得更为实用的结论.

### 参考文献

- [1] 庄钊文,刘永祥,黎湘.目标微动特性研究进展[J].电子学报,2007,35(3):520-525.  
Zhuang Zhao-wen, Liu Yong-xiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520-525. (in Chinese)
- [2] Chen V C, Li F Y, Ho S, et al. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [3] Chen V C, Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar

- Imaging and Signal Analysis [M]. Boston: Artech House, 2002.
- [4] Chen V C. Spatial and temporal independent component analysis of micro-doppler features[A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference [C]. Arlington, Virginia, USA: IEEE Press, 2005. 348 – 353.
- [5] Thayaparan T, Abrol S, Riseborough E, et al. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2007, 1(4): 289 – 299.
- [6] 吴晓芳, 刘阳, 王雪松, 等. 基于频率步进雷达时间-距离像的宽带微动特征提取[J]. 电子学报, 2009, 37(7): 1416 – 1421.  
Wu Xiao-fang, Liu Yang, Wang Xue-song, et al. Feature extraction of wide-band micro motions based on stepped-frequency radar time-range profiles[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(7): 1416 – 1421. (in Chinese)
- [7] He S, Zhou J X, Zhao H Z, et al. Analysis and extraction of stepped frequency radar signature for micro-motion structure [J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2009, 3(5): 484 – 492.
- [8] 罗迎, 张群, 柏又青, 等. 线性调频步进信号雷达微多普勒效应分析及目标特征提取[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2741 – 2746.  
Luo Ying, Zhang Qun, Bai You-qing, et al. Analysis of micro-Doppler effect and feature extraction of target in frequency-stepped chirp signal radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2741 – 2746. (in Chinese)
- [9] 李康乐, 刘永祥, 姜卫东, 等. 基于逆 Radon 变换的微动目标重构研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(1): 74 – 79, 86.  
Li Kang-le, Liu Yong-xiang, Jiang Wei-dong, et al. Reconstruction of target with micro-motions based on inverse Radon transform[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(1): 74 – 79, 86. (in Chinese)
- [10] 贺峰, 黄晓涛, 刘承兰, 等. 行进人体目标雷达瞬时多普勒特征分析[J]. 信号处理, 2010, 26(9): 1281 – 1288.  
He Feng, Huang Xiao-tao, Liu Cheng-lan, et al. Radar instantaneous Doppler signatures of pedestrian[J]. Signal Processing, 2010, 26(9): 1281 – 1288. (in Chinese)
- [11] 马梁, 王涛, 冯德军, 等. 旋转目标距离像长度特性及微运动特征提取[J]. 电子学报, 2008, 36(12): 2273 – 2279.  
Ma Liang, Wang Tao, Feng De-jun, et al. The characteristic of range profile and micro-motion feature extraction for rotary target[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2273 – 2279. (in Chinese)
- [12] 马梁, 王雪松, 李永祯, 等. 基于窄带测距信息的空间目标微动特征检测与估计[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2348 – 2352.  
Ma Liang, Wang Xue-song, Li Yong-zhen, et al. Detection and estimation for the character of micro-motion based on the narrowband tracing information[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(10): 2348 – 2352. (in Chinese)
- [13] 李康乐. 雷达目标微动特征提取与估计技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.  
Li Kang-le. Research on Feature Extraction and Parameters Estimation for Radar Targets with Micro-Motions[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 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 – 281.
- [15] 贺峰, 朱国富, 黄晓涛, 等. 基于 SFCW 雷达时间-距离像的摆动目标微动特征提取[J]. 信号处理, 2011, 27(2): 161 – 167.  
He Feng, Zhu Guo-fu, Huang Xiao-tao, et al. Micro-motion signature extraction of vibrating targets based on stepped frequency continuous wave radar time-range profiles[J]. Signal Processing, 2011, 27(2): 161 – 167. (in Chinese)
- [16] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 20 – 45.
- [17] 陈建军, 王飞行, 陈远征, 等. 频率步进雷达高分辨距离像解模糊方法研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(4): 93 – 97.  
Chen Jian-jun, Wang Fei-xing, Chen Yuan-zheng, et al. Research on achieving unambiguous high resolution range profiles for stepped-frequency radar[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(4): 93 – 97. (in Chinese)
- [18] Rodgers J L, Nicewander W A. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59 – 66.

#### 作者简介



贺峰 男, 1981 年出生, 吉林舒兰人, 2006 年毕业于空军雷达学院, 获工学硕士学位, 现为国防科学技术大学信息与通信工程专业博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理。  
E-mail: hfen2008@126.com

刘承兰 女, 1984 年出生, 山东曲阜人, 现为国防科学技术大学信息与通信工程专业博士研究生, 主要研究方向为雷达目标识别、雷达成像技术等。 E-mail: liuchenglan2010@163.com

朱国富 男, 1972 年出生, 河南开封人, 博士, 硕士生导师, 国防科学技术大学电子科学与工程学院副教授, 主要从事 SAR 信号处理、GMTI 信号处理等领域的研究工作。 E-mail: zhuguofu@yahoo.com.cn

黄晓涛 男, 1972 年出生, 湖北武汉人, 博士, 博士生导师, 国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 主要从事 SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息领域的工作。  
E-mail: hxttdh@yahoo.com