

# 逆合成孔径成像激光雷达微多普勒效应分析及特征提取

何 劲<sup>1</sup>, 张 群<sup>1,2</sup>, 罗 迎<sup>1</sup>, 杨小优<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077; 2. 复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433)

**摘 要:** 研究了基于逆合成孔径成像激光雷达的目标微多普勒效应, 分析了激光信号高载频和大带宽对目标微动点一维距离像的影响, 在此基础上建立了相应的微多普勒特征参数方程并讨论了快时间对微多普勒效应的影响. 针对逆合成孔径成像激光雷达系统目标微多普勒效应的特点, 提出了一种结合二值数学形态学腐蚀膨胀运算和推广 Hough 变换的目标微多普勒特征提取方法. 仿真实验验证了文中微多普勒效应理论分析和微多普勒特征提取算法的正确性, 并证明了逆合成孔径成像激光雷达对厘米或毫米量级微动观测的有效性.

**关键词:** 逆合成孔径成像激光雷达; 微多普勒; 二值数学形态学; Hough 变换; 目标识别

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2052-08

## Analysis of Micro-Doppler Effect and Feature Extraction of Target in Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar

HE Jin<sup>1</sup>, ZHANG Qun<sup>1,2</sup>, LUO Ying<sup>1</sup>, YANG Xiao-you<sup>1</sup>

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China;

2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** The micro-Doppler effect based on the inverse synthetic imaging ladar is studied, and the influence of the high carrier frequency and the bandwidth of laser signal on the range profiles is also analyzed. Furthermore, the corresponding parameters equation of micro-Doppler is constructed and then the influence of the fast-time on the micro-Doppler effect is also discussed. Based on the Extended Hough Transform and the erosion and dilation operations in binary mathematical morphology, a novel extraction method of micro-Doppler effect is proposed for the inverse synthetic imaging ladar accordingly. The simulations are given to verify the theoretical derivation and the validity of the proposed method. In addition, the validity of the measurement of the inverse synthetic imaging ladar for the micro-motion at the centimeter-level or the millimeter-level is also illustrated in the simulations.

**Key words:** inverse synthetic aperture imaging ladar; micro-Doppler (m-D); binary mathematical morphology; Hough transform; target recognition

### 1 引言

近年来, 隐身技术、伪装技术等目标特征控制技术的发展大大增加了雷达目标识别的难度<sup>[1]</sup>. 这使得基于微动特征的目标识别技术成为了目标探测识别领域的研究热点. 目标微动特征是指目标或目标部件除了质心平动以外的振动、转动和加速运动等等, 这些微动会对雷达回波信号产生附加的频率调制, 这就是微多普勒效应 (micro-Doppler effect)<sup>[2,3]</sup>. 由于多普勒现象敏感于信号的工作频率, 因此, 微多普勒的概念首先是从相干激光雷达系统中引出的<sup>[4]</sup>, V. C. Chen 最早于 2000 年将微

多普勒的概念引入雷达成像领域<sup>[5]</sup>, 并开展了深入研究<sup>[6,7]</sup>. 在此基础上, 文献[8]介绍了空中微动旋转目标的二维成像; 文献[9]分析了频率步进雷达的微多普勒特征提取; 文献[10]利用美国海军 APY-6 雷达获取的 SAR 数据提取了地面振动的角反射器的微动特征; 文献[11]提出了一种基于推广的 Hough 变换来提取微多普勒信息的方法; 文献[12]和[13]讨论了基于微多普勒特征的 SAR 成像干扰技术; 等等. 但由于微多普勒信息刻画的是目标的精细运动特征, 要实现其准确提取, 必然要求成像雷达具有较高的成像分辨率. 目前常规雷达的频段和带宽很难提供毫米甚至亚毫米级的分辨精度以

满足描述目标更为精细的微动特征所需的分辨率,如振幅、周期、加速度等.为解决这一问题,本文研究基于逆合成孔径成像激光雷达(Inverse Synthetic Aperture Imaging Ladar, ISAIL)的目标微多普勒效应,并提出了相应的目标微动特征提取方法.目前,国内外已经开展了一些基于单频激光信号的微多普勒效应研究<sup>[14]</sup>,但基于宽带激光信号的微多普勒特征研究还未见报道.

ISAIL 利用激光信号的超大带宽提高雷达的距离向分辨率,利用合成孔径技术提高雷达的方位向分辨率,可以实现对远距离运动目标的超高分辨率实时成像,在近年来逐渐受到关注<sup>[15]</sup>.林肯实验室于 1994 年首次报道了它们成功研制的固体激光合成孔径雷达实验装置.2002 年,美国海军研究实验室在实验室中完成了对目标的二维成像.2006 年 4 月美国国防高级研究计划局(DARPA)资助的项目已经成功得到了机载合成孔径成像激光雷达的地面场景成像图<sup>[16]</sup>.国内在这方面也开展了许多研究,文献<sup>[17]</sup>介绍了一种机载合成孔径成像激光雷达的成像算法,文献<sup>[18]</sup>给出了实验室环境下对转台目标的成像结果.与微波信号相比,激光信号具有更好的相干性和频率敏感性,而且,在结合了合成孔径技术后,ISAIL 能有效地实现对运动目标的成像和识别,成像分辨率也较微波雷达有了大幅提高,因此,研究基于该体制雷达的微多普勒效应具有重要意义.本文研究了 ISAIL 的回波信号特性,讨论了激光信号的大带宽和高载频对回波信号的影响,建立了相应的微多普勒特征参数方程,分析了快时间对微多普勒效应的影响.并提出了一种基于二值数学形态学腐蚀膨胀运算和推广 Hough 变换相结合的目标微多普勒特征提取算法,有效解决了激光信号大带宽导致的微动点一维距离像展宽问题.仿真实验验证了文中微多普勒效应理论分析和特征提取算法的正确性,并通过比较证明了 ISAIL 对厘米量级甚至毫米量级微动观测的有效性.

## 2 逆合成孔径成像激光雷达微多普勒效应

### 2.1 逆合成孔径成像激光雷达回波信号分析

ISAIL 主要通过发射极大带宽的线性调频连续波激光信号实现对目标成像,假设  $i$  为目标上任一散射点,经过时延  $\tau_i$  后,雷达与目标的距离为  $R_i$ ,则目标的回波信号可以表示为:

$$s_{ir}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_i) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_i)^2\right)\right) \quad (1)$$

其中  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形窗函数,当  $|t| \leq T_p/2$  时  $\text{rect}(t/T_p) = 1$ ,  $|t| > T_p/2$  时  $\text{rect}(t/T_p) = 0$ .  $f_c$  表示信号的载频,  $\mu = \Delta f/T_p$  表示信号的调频斜率,  $T_p$  为脉冲重复间隔,信

号带宽  $B = \mu T_p$ .  $t_k$  表示快时间采样序列,即脉内时间,  $t_m$  是合成孔径上的慢时间采样序列,即脉间时间,  $t_m = mT_p$ ;  $m = 1, 2, \dots, M$ ;  $t = t_m + t_k$ .

假设初始时刻目标与雷达的距离为  $R_0$ ,并以径向速度  $v$  远离雷达运动,则  $t$  时刻雷达收到的回波信号是在  $t - \tau_i$  时刻发射的,而照射到目标上的时间是  $t' = t - (1/2)\tau_i$ ,令  $R(t_m)$  表示不考虑快时间时,收到第  $m$  个脉冲时雷达与目标的距离,  $R(t_m) = R_0 + vt_m$ . 考虑快时间后,信号照射时雷达与目标的距离可表示为  $R_i = R(t_m) + vt_k$ . 采用光外差相干探测的方法探测回波信号,假设估计得到的参考距离为  $R_{\text{ref}}$ ,则参考时延  $\tau_{\text{ref}} = 2R_{\text{ref}}/c$  (对于常规目标而言,  $v \ll c$  时,可以忽略  $v$  对时延的影响),参考本振信号可以写为

$$s_{\text{ref}}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_{\text{ref}}}{T_p'}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_{\text{ref}})^2\right)\right) \quad (2)$$

其中  $T_p'$  比  $T_p$  略大. 这样经过外差探测后,可以得到以下输出信号

$$\begin{aligned} s_{if}(t_k, t_m) &= s_i(t_k, t_m) s_{\text{ref}}^*(t_k, t_m) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \exp(-j2\pi f_c(\tau_i - \tau_{\text{ref}})) \\ &\quad \cdot \exp(-j2\pi\mu t_k(\tau_i - \tau_{\text{ref}})) \exp(j\pi\mu(\tau_i^2 - \tau_{\text{ref}}^2)) \\ &= \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_i}{T_p}\right) \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R) \\ &\quad \cdot \exp(-j\frac{4\pi\mu}{c}(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c})\Delta R) \exp(j\frac{4\pi\mu}{c^2}\Delta R^2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\Delta R = R_i - R_{\text{ref}}$ . 式(3)中共包含 3 个相位项,其中第 1 项为线性相位项,当  $\Delta R$  变化时,该项会产生线性相位变化;第 2 项为距离项,表征了目标和参考点的相对距离;第 3 项为残余视频相位(RVP)项,对成像没有帮助,可以通过补偿去除.令  $\Delta R' = R(t_m) - R_{\text{ref}}$ ,将  $R_i = R(t_m) + vt_k$  代入式(3)后可以得到

$$\begin{aligned} s_{if}(t_k, t_m) &= \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_i/c}{T_p}\right) \exp\left(-j4\pi\left(f_c\frac{\Delta R'}{c} - \mu\frac{\Delta R'^2}{c^2}\right)\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-\frac{4\pi\mu}{c}\left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\Delta R'\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\frac{2v}{c}f_c - \frac{4\mu R(t_m)v}{c^2}\right)t_k\right) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi\left(\mu\frac{2v}{c} - \frac{1}{2}\mu\frac{4v^2}{c^2}\right)t_k^2\right) \end{aligned} \quad (4)$$

若用微波脉冲信号作为发射源,当  $v \ll c$  时,可以忽略  $t_k$  的影响,令  $R_i \approx R(t_m)$ <sup>[19]</sup>. 在此基础上,去除 RVP 项的影响,并作关于  $t_k$  的傅立叶变换,可得

$$s'_f(f, t_m) = T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{4\pi\mu}{c}\Delta R'\right)\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta R\right) \quad (5)$$

可以看出,  $|s'_f(f, t_m)|$  的峰值点位于  $f = -\frac{4\pi\mu\Delta R'}{c}$ ,

此即为点目标的一维距离像. 但是由于 ISAIL 采用调频连续波信号作为辐射源,  $t_k$  的影响不能忽略, 而且, 激光信号的带宽和载频都要比微波信号高 3-5 个数量级, 所以即使  $v \ll c$ , 式(4)中第 3 个相位项和第 4 个相位项的第 1 项都不能忽略, 这两个相位会使目标的一维距离像出现平移和展宽(由于  $c^2$  极大, 以  $c^2$  为分母的相位项可以忽略). 因此式(4)可以近似为

$$s_{if}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_l/c}{T_p}\right) \exp\left(-j4\pi(f_c \cdot \frac{\Delta R'}{c} - \mu \cdot \frac{\Delta R'^2}{c^2})\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c})\Delta R'\right) \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}vt_k\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}vt_k^2\right) \quad (6)$$

式(6)即为 ISAIL 经过外差探测后接收到的回波信号表达式.

## 2.2 微多普勒特征参数建模

基于 ISAIL 的微多普勒效应分析应该在式(6)的基础上进行. 如图 1 所示,  $OXYZ$  为全局坐标系,  $oxyz$  为目标本地坐标系, 目标主体以径向速度  $\mathbf{v}$  运动, 雷达与目标参考点的初始距离为  $\mathbf{R}_0$ , 经过时延  $t$  后雷达与目标参考点的距离为  $\mathbf{R}_l$ .  $C$  点为参考点, 在标准运动补偿后, 其可视为静止点, 散射点  $P$  为目标上的微动点, 以速度  $\mathbf{v}_m$  与参考点  $C$  做相对运动,  $\mathbf{v}_m$  是关于全时间  $t$  的函数.

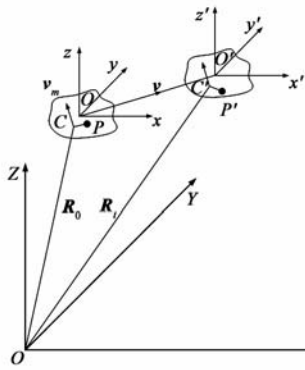


图1 ISAIL中含微动部件目标微多普勒效应的几何示意图

经过时延  $t$  后, 目标微动点与参考点的相对距离为  $\mathbf{r}(t)$ ,  $\mathbf{r}(t)$  是关于微动速度  $\mathbf{v}_m$  和全时间  $t$  的函数, 由于脉内时间  $t_k$  很短, 所以可以近似认为微动点在脉内时间内做匀速运动, 即  $\mathbf{v}_m$  是近似为慢时间  $t_m$  的函数,  $\mathbf{r}(t)$  可以表示为脉间时间目标微动点运动的距离与脉内时间目标微动点运动的距离之和, 即  $\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(t_m) + \mathbf{r}(t_k) = \mathbf{r}(t_m) + \mathbf{v}_m(t_m)t_k$ . 因此, 微动点到雷达的径向距离可以表示为

$$R_{P't} = (\mathbf{R}_l + \mathbf{r}(t))^T \mathbf{n} = (\mathbf{R}_l + \mathbf{r}(t_m) + \mathbf{v}_m(t_m)t_k)^T \mathbf{n} \quad (7)$$

其中  $\mathbf{n}$  为雷达视线方向单位矢量,  $T$  表示的是矩阵转置. 将式(7)代入式(6), 可得微动点回波信号方程为

$$s_{if}(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_{P't}/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi\left(f_c \frac{(\mathbf{r}(t_m) + \mathbf{v}_m(t_m)t_k)^T \mathbf{n}}{c} - \mu \frac{((\mathbf{r}(t_m) + \mathbf{v}_m(t_m)t_k)^T \mathbf{n})^2}{c^2}\right)\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}\left(t_k - 2\frac{R_{\text{ref}}}{c}\right)(\mathbf{r}(t_m) + \mathbf{v}_m(t_m)t_k)^T \mathbf{n}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}|\mathbf{v}|t_k\right) \exp\left(-j\frac{4\pi\mu}{c}|\mathbf{v}|t_k^2\right) \quad (8)$$

令式(8)中的相位为  $\Phi$ , 去除 RVP 项后, 对  $\Phi$  求关于  $t_k$  的导数, 可以得到

$$\frac{d\Phi}{dt_k} = -(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) \quad (9)$$

其中  $\varphi_1 = 2\mu(\mathbf{r}(t_m))^T \mathbf{n}/c + 2f_c((\mathbf{v}_m(t_m))^T \mathbf{n} + \mathbf{v})/c$ ,  $\varphi_2 = 4\mu((\mathbf{v}_m(t_m))^T \mathbf{n} + \mathbf{v})t_k/c$ ,  $\varphi_3 = 4\mu R_{\text{ref}}(\mathbf{v}_m(t_m))^T \mathbf{n}/c^2$ . 式(9)中,  $\varphi_1$  表示的是目标微动点的多普勒频率;  $\varphi_2$  是目标的微动和主体的平动引起的脉内展宽, 它会导致微多普勒的展宽, 影响微多普勒特征的精确提取, 但它的影响可以通过一定的处理去除(详见第3节), 且不会对微多普勒的时频分布产生本质的影响, 因此在进行傅立叶变换时可以暂不考虑;  $\varphi_3$  是附加项, 因为  $c^2$  极大, 所以可以忽略. 忽略导致  $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  的相位项后, 对式(9)进行关于  $t_k$  的傅立叶变换, 可得

$$s_{if}(f_i, t_m) = T_p \text{sinc}\left(f_i + \frac{2\mu}{c}\mathbf{r}(t_m) + \frac{2f_c}{c}(\mathbf{v}_m(t_m) + \mathbf{v})\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c}\mathbf{r}(t_m)\right) \quad (10)$$

因此, 基于 ISAIL 的目标微动点微多普勒特征的表情式可以写为:

$$f_{m-D} = -\left(\frac{2\mu}{c}(\mathbf{r}(t_m))^T \mathbf{n} + \frac{2f_c}{c}(\mathbf{v}_m(t_m))^T \mathbf{n}\right) \quad (11)$$

## 2.3 旋转微多普勒特征分析

下面我们将讨论具有代表性的微动形式, 首先对旋转点进行分析, 旋转点目标的运动状态如图 2 所示,  $O'$  点为参考点,  $P$  点为旋转点, 以旋转频率  $\omega$  绕旋转中心  $C$  点旋转, 假设时间  $t$  后,  $P$  点旋转至位置  $P'$ . 雷达到参考点的距离为  $\mathbf{R}_l$ , 旋转点  $P$  投影到雷达视线方向上的位置为  $P'$ , 旋转中心  $C$  投影在雷达视线方向上的位置为  $C'$ . 因此, 可将旋转点  $P$  绕旋转中心  $C$  的旋转运动等效为雷达视线方向上  $P'$  点绕  $C'$  点的振动. 假设雷达到参考点的初始距离为  $\mathbf{R}_0$ , 目标整体的运动速度为  $\mathbf{v}$ , 旋转点在雷达视线上的投影绕旋转中心在雷达视线上的投影的振幅为  $r$ , 初始相位为  $\theta_0$ , 则经过时间  $t$  后, 雷



SAIL的微多普勒特征在频率-慢时间平面上会出现展宽,直接采用推广 Hough 变换进行提取会导致提取参数的准确性下降.本文将用腐蚀膨胀运算<sup>[21]</sup>提取微多普勒曲线的边缘特征.先对图像进行平滑处理,并将其转化为二值图像,以剔除噪声的影响.然后利用腐蚀膨胀运算提取曲线边缘.设  $f$  为图像中的目标区域,用结构元素  $a$  对  $f$  进行膨胀记为  $f \oplus a$ ,可以定义

$$(f \oplus a)(x, y) = \max\{f(x - x', y - y') + a(x', y') \mid (x', y') \in D_a\} \quad (24)$$

其中,  $D_a$  是  $a$  的定义域,  $f(x, y)$  在  $f$  的定义域外的假设为  $-\infty$ .可以认为结构元素关于其原点旋转并在图像中的所有位置平移,在每个平移位置,旋转的结构元素的值与图像像素值相加并计算出最大值.

用结构元素  $b$  对  $f$  进行腐蚀记为  $f \ominus b$ ,可以定义为

$$(f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x + x', y + y') - b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\} \quad (25)$$

其中,  $D_b$  是  $b$  的定义域,  $f(x, y)$  在  $f$  的定义域外的假设为  $-\infty$ .通过将结构元素  $b$  平移到图像中的所有位置.在每个平移后的位置,结构元素值减去图像的像素值,可以使所得值最小.

将膨胀后的微多普勒图像减去腐蚀后的微多普勒图像,就能提取出微多普勒图像的边缘信息.原来的一条“粗”的正弦曲线将变为两条“细”的正弦曲线,但曲线的频率、频偏和初相都不会发生改变,只是得到的基线位置略有差别,可以通过对检测到的两条正弦曲线的基线进行加权平均得到更准确的基线位置.在此基础上可利用推广的 Hough 变换提取曲线的参数.推广 Hough 变换检测曲线的原理可以简述如下:假设参数组  $(a_1, a_2, \dots, a_N)$  表示曲线,则每个参数计数器只需简单计算满足以下曲线方程的点  $(x_i, y_i)$  的个数

$$f(a_1, a_2, \dots, a_N, x_i, y_i) = 0 \quad (26)$$

而 HT 空间的局部最大值就意味着一条曲线的存在.令  $\Omega = \omega/2\pi, f_{OC} = 2\mu R_{OC}/c$  根据微多普勒信号在时频平面上的曲线方程式(18),可构造 Hough 变换方程

$$f_{OC} = f_m - DR - H \sin(2\pi\Omega t + \varphi) \quad (27)$$

利用 Hough 变换可将  $(t, f)$  平面的曲线检测问题转化为参数空间  $(f_{OC}, H, \Omega, \varphi)$  的峰值检测问题.如果因距离向采样率不足而导致卷绕,则 Hough 变换方程需要重新构造为:

$$f_{OC} = \left( \text{mod} \left( f_m - DR - H \sin(2\pi\Omega t + \varphi) + \frac{F_s}{2}, F_s \right) - \frac{F_s}{2} \right) \quad (28)$$

检测到曲线的参数后,可以直接获取微动点的旋转(振动)频率  $\Omega$  和  $H$  值,并通过式(17)或式(20)计算出旋转点或振动点在雷达视线方向上的旋转半径或振

幅.提取振动半径较小的振动点的微多普勒特征时,若方位向采样率不足,则要将 Hough 变换方程重写为:

$$\text{mod}(f_m - DV - H_1 \sin(2\pi\Omega t_m + \theta_0), \text{PRF}) = 0 \quad (29)$$

## 4 仿真验证

### 4.1 旋转和振动微多普勒特征验证及提取

假设雷达发射信号的参数为  $f_c = 3 \times 10^{13}$  Hz,  $T_p = 300\mu\text{s}$ ,  $B = 30$  GHz,  $\text{PRF} = 2400$  Hz, 采样频率  $F_s \approx 2.667 \times 10^6$  Hz, 俯仰角  $\theta_R$  为  $0.7854$  rad, 方位角  $\theta_A$  为  $1.5708$  rad. 雷达与目标的初始距离为  $10$  km, 目标沿距离向(图 1 中所示的  $Z$  轴方向)的运动速度为  $20$  m/s, 沿方位向(图 1 中所示的  $X$  轴方向)的运动速度为  $20$  m/s, 成像时间约为  $0.3333$  s. 目标主体模型如图 3(a) 所示, 是一个由  $91$  个主体散射点构成的 AS350 直升机模型, 其尺寸为真实飞机的  $1/20$ . 直升机模型共包含  $3$  片水平旋翼, 每一片旋翼的半径为  $0.2273$  m, 假设每一片旋翼均包含两个散射点, 旋转半径分别为  $0.2273$  m 和  $0.1073$  m, 旋转频率为  $6.57$  Hz. 为了验证所提方法的鲁棒性, 目标回波信号中加入了高斯白噪声, 信噪比  $\text{SNR} = -5$  dB. 对回波信号进行关于快时间  $t_k$  的一次傅立叶变换, 得到的在时频平面上的目标微多普勒特征如图 3(b) 所示. 第  $100$  次回波的一维距离像如图 3(c) 所示. 可以看出, 由于激光信号的带宽极大, 目标的微多普勒特征出现了不同程度的展宽, 这影响了微多普勒参数的提取. 而且, 此时从图 3(b) 已经无法准确反映目标的真实频偏, 这是考虑快时间后带来的影响, 需要将微多普勒参数检测结果与式(17)结合才能算出目标旋转点在雷达视线方向上的振幅. 图 3(b) 中三个半径较小的旋转点的微多普勒特征是完整的, 但由于采样率不够, 三个半径较大的旋转点的微多普勒特征出现了卷绕, 要用式(28)进行微多普勒参数检测, 并结合式(17)计算其在雷达视线方向上的振幅.

提取微多普勒参数先要剔除主体回波的影响, 从频率-慢时间平面剔除主体回波的方法很多, 本文用的是慢时间积分法<sup>[22]</sup>. 剔除影响后得到的谱图如图 3(d) 所示, 将其转换为二值图像, 结果如图 3(e) 所示. 图 3(f) 为经过膨胀腐蚀处理后的微多普勒特征图像, 共有十二条曲线, 但每一条正弦曲线主要特征(频率、振幅和初相)与图 3(b) 中相应的曲线完全相同, 曲线变细后将更有利于微多普勒参数的提取. 经过扩展 Hough 变换检测到的微多普勒曲线参数如表 1 所示. 旋转点在雷达视线方向上的振幅  $r$  可以通过检测到的最大频偏  $H$  和式(17)计算得到. 目标的旋转半径推算结果如表 2 所示. 与旋转散射点的真实散射半径基本相符, 这说明在噪声为  $-5$  dB 的情况下本文的检测算法是有效的. 由于

图像出现了展宽效应,在仿真条件相同的情况下采用文献[11]所提的 Hough 变换方法进行了实验,共检测出 23 条曲线,频偏和中心频率各不相同,这一结果将直接影响对旋转散射点个数的判断.此外,由于需要考虑脉

内时间的影响,基于 ISAIL 的目标微多普勒特征具有特殊性,文献[11]的方法不能通过检测到的频偏算出旋转散射点的真实旋转半径.

表 1 旋转点频率-慢时间平面上检测到的曲线参数

序号	1	2	3	4	5	6
$f_{oc}$ (Hz)	$2.134 \times 10^5$	$2.134 \times 10^5$	$2.134 \times 10^5$	$0.529 \times 10^5$	$0.529 \times 10^5$	$0.529 \times 10^5$
$H$ (Hz)	$6.271 \times 10^5$	$6.268 \times 10^5$	$6.272 \times 10^5$	$6.272 \times 10^5$	$6.276 \times 10^5$	$6.266 \times 10^5$
	$1.3287 \times 10^6$	$1.3265 \times 10^6$	$1.3275 \times 10^6$	$1.3279 \times 10^6$	$1.3281 \times 10^6$	$1.3284 \times 10^6$
$\Omega$ (Hz)	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6
$\varphi$ (rad)	1.6	1.6	3.7	3.7	5.8	5.8

表 2 旋转点的半径

序号	1	2	3	4	5	6
$r$ (m)	0.07593	0.07595	0.07594	0.07594	0.07599	0.07587
	0.1609	0.1606	0.1607	0.1608	0.1608	0.1609
$r_{real}$ (m)	0.10738	0.10733	0.1074	0.1074	0.10746	0.10729
	0.2275	0.2272	0.2273	0.2274	0.2274	0.2275

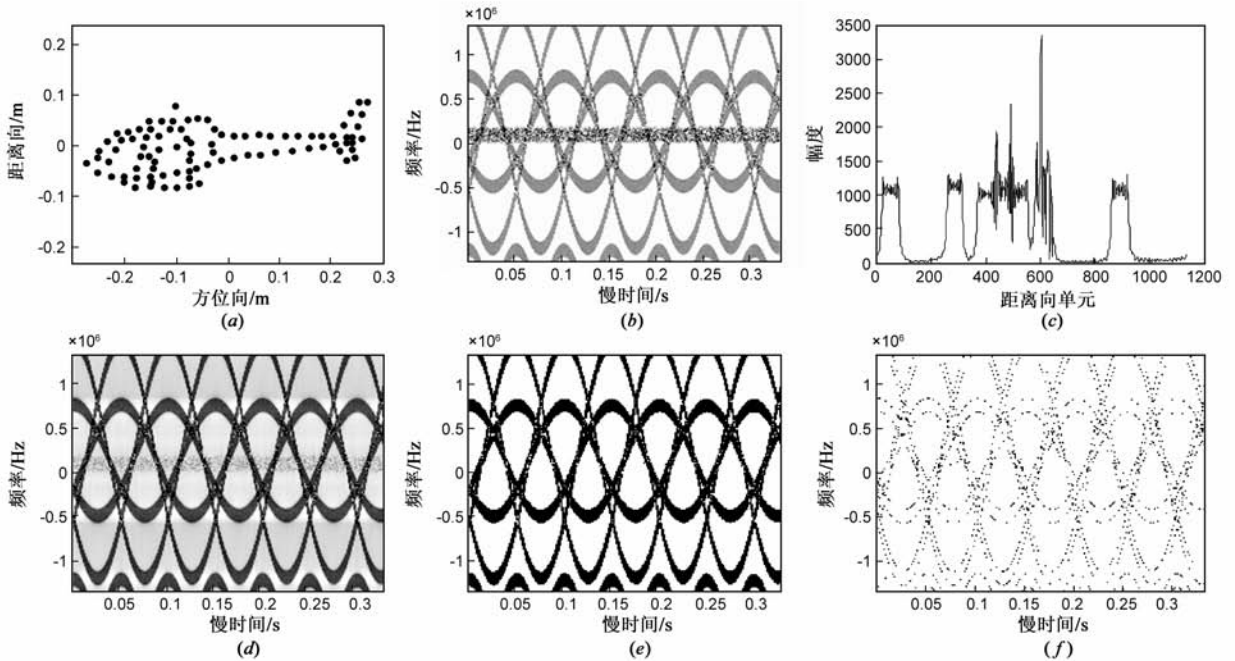


图 3 旋转点的微多普勒特征

#### 4.2 振动半径较小的振动点微多普勒特征验证及提取

假设雷达发射信号的参数为  $f_c = 3 \times 10^{13}$  Hz,  $T_p = 300 \mu\text{s}$ ,  $B = 30$  GHz,  $\text{PRF} = 2400$  Hz, 采样频率  $F_s \approx 2.667 \times 10^6$  Hz, 俯仰角  $\theta_R$  为 0 rad, 方位角  $\theta_A$  为 1.5708 rad. 目标模型如图 4(a)所示,由 24 个主体散射点和 5 个振动散射点组成,雷达与目标的初始距离为 10 km,目标沿距离向(图 1 中所示的 Z 轴方向)的运动速度为 20 m/s,沿方位向(图 1 中所示的 X 轴方向)的运动速度为 20 m/s,成像时间约为 0.5 s. 振动点的振动中心位于图 4(a)中圆

圈的位置,由上至下 5 个振动的振动半径和频率分别为 1 mm, 0.5 mm, 0.5 mm, 0.5 mm, 1 mm 和 4 Hz, 3 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz. 振动散射点相对振动中心点上下振动,得到的回波信号在频率-慢时间平面上近似为 5 条展宽的直线,结果如图 4(b)所示. 抽取这 5 条直线所在距离单元作 Gabor 变换,得到的时频分布如图 4(c),图 4(d)和图 4(e)所示. 图 4(c)为最外侧两个振动点的 Gabor 变换结果,由于振幅较大,方位向采样不足,因此发生了卷绕;图 4(d)为中间两个振动点的 Gabor 变换结果;图 4(e)为混杂在主体散射点中的振动点的 Gabor 变换结果,主体散射点和振动散射点的回波混叠在一起. 由于主体

散射点回波信号的相位近似不变,因此对其进行 Gabor 变换不会得到新的信息,而对振动散射点的回波进行 Gabor 变换则会进一步得到能体现其特征的正弦曲线,同样可以采用慢时间积分法剔除主体散射点回波的影响.经膨胀腐蚀处理后,结果如图 4(f)、图 4(g)和图 4(h)所示,作推广的 Hough 变换,检测到的微多普勒曲

线参数组( $H_1, \Omega, \varphi_1$ )如表 3 所示.共有 6 条正弦曲线,其中两条为混合在主体散射点中的振动点的微多普勒特征.振动点的振动频率被准确检测出来.由检测到的  $H_1$  和式 (20) 可算出振动点的振幅为 1.077mm, 0.503 mm, 0.512 mm, 0.504mm, 0.509mm 和 1.089mm, 与真实值基本一致.

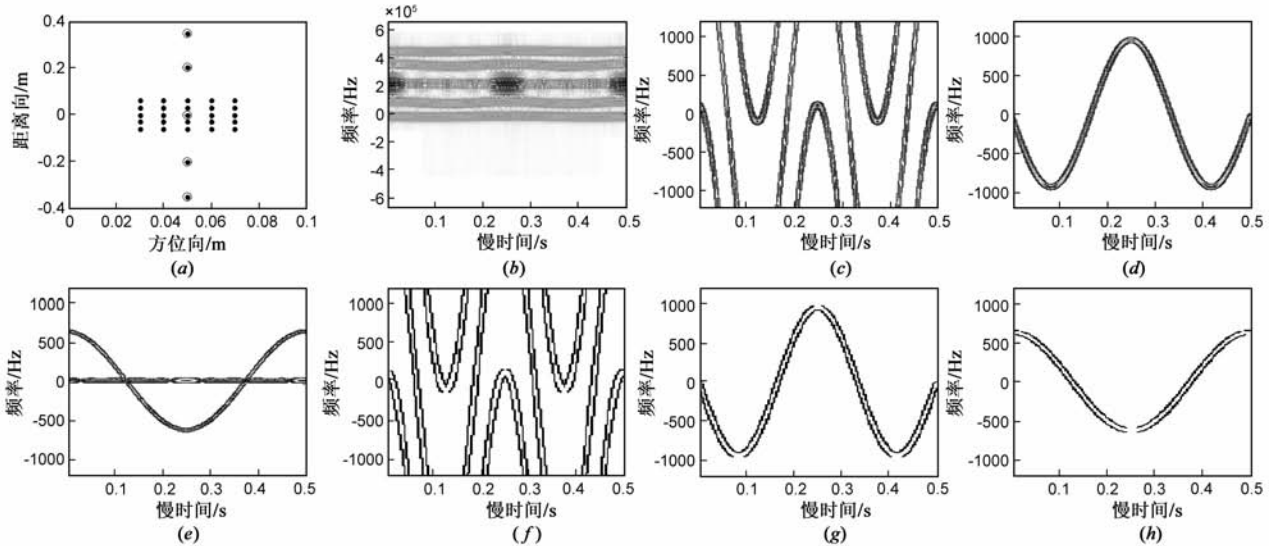


图4 振动点的微多普勒特征

表 3 振动点时频平面上检测到的微多普勒曲线参数

序号	1	2	3	4	5	6
$H_1$ (Hz)	2707	948	643	633	959	1737
$\Omega$ (Hz)	4	3	2	2	3	4
$\varphi_1$ (rad)	3.1	3.1	1.6	1.6	3.1	3.1

## 5 结论

微多普勒特征对目标的成像、分类与识别具有重要的意义,而 ISAIL 能够利用其高分辨特性实现对远距离目标和微动较小目标微多普勒特征的分析 and 提取,因此,研究基于 ISAIL 的运动目标微多普勒特征具有广泛的应用前景.本文针对 ISAIL 的信号特点,建立了相应的微多普勒特征参数方程,对基于 ISAIL 的微动目标微多普勒特征进行了详细分析,并提出了一种基于二值数学形态学腐蚀膨胀运算和推广 Hough 变换相结合的目标微多普勒特征提取算法,有效提取了微动目标的微多普勒特征,为基于 ISAIL 的精细目标探测、分类、识别以及成像技术研究奠定了基础.

## 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, HO S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(1): 2-21.  
[3] 高红卫,谢良贵,文树梁,等.摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J].电子学报,2008,36(12):2497-2502.  
GAO Hong-wei, XIE Liang-gu, WEN Shu-liang, et al. Analysis and extraction of micro-Doppler induced by cone-shaped target's wobbling [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(12): 2497-2502. (in Chinese)  
[4] STEPHEN M H, THOMAS J A, SAMMY W H, et al. Agile multiple pulse coherent lidar for range and micro-Doppler measurement [A]. Proceedings of SPIE on Laser Radar Technology and Applications III [C]. Orlando, USA: SPIE Press, 1998. 259-269.  
[5] CHEN V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform [A]. Proceedings of Statistical Signal and Array Processing [C]. Pocono Manor, USA: IEEE Press, 2000. 463-466.  
[6] CHEN V C, LI F. Analysis of micro-Doppler signatures [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271-276.  
[7] CHEN V C. Radar signatures of rotor blades [A]. Proceedings of SPIE on Wavelet Applications VIII [C]. Orlando, USA: SPIE Press, 2001. 4391: 63-70.  
[8] 白雪茹,周峰,邢孟道,等.空中微动旋转目标的二维 IS-AR 成像算法 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 1937-1943.

- BAI Xue-ru, ZHOU Feng, XING Meng-dao, et al. 2D ISAR imaging algorithm for air micro-motion targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(9): 1937 - 1943. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] SPARR T, KRANE B. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 277 - 283.
- [11] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291 - 299.
- [12] 吴晓芳, 代大海, 王雪松, 等. 基于微动调制的 SAR 新型有源干扰方法[J]. 电子学报, 2010, 38(4): 954 - 959.
- WU Xiao-fang, DAI Da-hai, WANG Xue-song, et al. A novel method of active jamming for SAR based on micro motion modulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 954 - 959. (in Chinese)
- [13] 陈思伟, 代大海, 李永祯, 等. SAR 二维余弦调相转发散射波干扰原理[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2620 - 2625.
- CHEN Si-wei, DAI Da-hai, Li Yong-zhen, et al. The theory of 2-D cosinusoidal phase-modulated repeater scatter-wave jamming to SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2620 - 2625. (in Chinese)
- [14] 张海洋, 赵长明, 蒋奇君, 等. 基于相干激光雷达的激光微多普勒探测[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1981 - 1985.
- Zhang Hai-yang Zhao Chang-ming, Jiang Qi-jun, et al. Laser detection on micro-Doppler effect in coherent lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1981 - 1985. (in Chinese)
- [15] 许楠, 刘立人, 鲁伟. 合成孔径激光成像雷达距离向等延时的信号处理结构和算法[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1405 - 1409.
- XU Nan, LIU Li-ren, LU Wei. Signal processing construction and algorithm of range equal delay in SAIL[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1405 - 1409. (in Chinese)
- [16] 王省伟, 侯天晋, 周鼎富, 等. 合成孔径激光雷达[J]. 激光技术, 2008, 32(1): 4 - 7.
- WANG Sheng-wei, HOU Tian-jin, ZHOU Ding-fu, et al. Synthetic aperture lidar[J]. Laser Technology, 2008, 32(1): 4 - 7. (in Chinese)
- [17] 郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1183 - 1190.
- GUO Liang, XING Meng-dao, LIANG Yi, et al. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging lidar data processing[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1183 - 1190. (in Chinese)
- [18] 郭亮, 邢孟道, 张龙, 等. 室内距离向合成孔径激光成像的实验研究[J]. 中国科学 E 辑, 2009, 39(10): 1678 - 1684.
- [19] 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)
- [20] BALLARD D H. Generalization the Hough transform to detect arbitrary shapes[J]. Pattern Recognition, 1981, 13(2): 111 - 122.
- [21] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004. 276 - 278.
- [22] 罗迎, 池龙, 张群, 等. 用慢时间域积分法实现雷达目标微多普勒信息提取[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 2055 - 2059.
- LUO Ying, CHI Long, ZHANG Qun, et al. Extraction of micro-Doppler information based on slow-time integration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(8): 2055 - 2059. (in Chinese)

#### 作者简介



何 劲 男, 1984 年出生于福建南平, 现为空军工程大学电讯工程学院博士生, 已在国内外学术期刊和会议录上发表和录用论文 20 余篇. 研究方向: 雷达成像与目标识别、合成孔径激光雷达和电子对抗.

E-mail: hjelva@163.com



张 群 男, 1964 年出生于陕西合阳, 现为空军工程大学电讯工程学院教授、博士生导师, IEEE Senior Member, 中国电子学会无线电定位技术分会委员. 发表学术论文 100 余篇, 其中 SCI、EI 检索 60 余篇次. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像和电子对抗.

E-mail: zhangqunus@gmail.com