

# 逆合成孔径成像激光雷达微多普勒特征分析

王 硕<sup>1</sup>, 何 劲<sup>2</sup>, 杨小优<sup>2</sup>, 罗 迎<sup>2</sup>

(1. 河南商业高等专科学校, 河南 郑州 450045; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**逆合成孔径成像激光雷达是一种结合将激光信号和逆合成孔径原理相结合的新体制雷达, 能实现对运动目标的超高分辨成像, 为提取目标的精细微动特征提供了新的途径。研究了基于逆合成孔径成像激光雷达的目标振动微多普勒特征, 分析了目标运动时激光信号的高载频和大带宽对目标微多普勒特征的影响, 并通过仿真实验对基于逆合成孔径成像激光雷达的目标微多普勒特征和基于微波波段逆合成孔径雷达的目标微多普勒特征进行了比较, 证明了逆合成孔径成像激光雷达能够提供足够的分辨率来分析微小目标微动部件带来的多普勒效应。

**关键词:**微多普勒效应; 逆合成孔径成像激光雷达; 目标识别

中图分类号: TN958

文献标识码: A

## Micro-Doppler feature analysis in inverse synthetic aperture imaging lidar

WANG Shuo<sup>1</sup>, HE Jin<sup>2</sup>, YANG Xiao-you<sup>2</sup>, LUO Ying<sup>2</sup>

(1. Henan Business College, Zhengzhou 450045, China;

2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The inverse synthetic aperture imaging lidar (ISAIL) is a new kind of radar where the inverse aperture technique is introduced into the imaging lidar. ISAIL can obtain the image of target with ultra-high resolution, which provides a new approach for extraction of target's fine micro-motion features. In the paper, the micro-Doppler (m-D) features of vibration in ISAIL are analyzed, and the influences of high carrier frequency and large bandwidth of laser signal on m-D features are discussed. The m-D features in ISAIL are compared with that in microwave inverse synthetic aperture radar (ISAR), and the simulations demonstrate that the ISAIL can provide adequate resolution for extraction the m-D features of target with tiny micro-motions.

**Key words:** micro-Doppler (m-D) effect; inverse synthetic aperture imaging lidar (ISAIL); target recognition

### 1 引言

逆合成孔径成像激光雷达 (inverse synthetic aperture imaging lidar, ISAIL) 是融合了逆合成孔径技术和激光成像原理的一种新体制雷达<sup>[1-2]</sup>。它利用激光信号的超大带宽获得高的距离分辨率, 利用逆合成孔径技术合成虚拟天线阵列获得高的方位分辨率, 能实现对运动目标的超高分辨成像, 因此在近年来受到了越来越多的关注。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用波长为 1.55  $\mu\text{m}$ , 功率为 5 mW 的单模可调谐激光源在实验

室中完成了对目标的二维成像<sup>[3]</sup>。国内在这方面也开展了许多研究<sup>[4]</sup>, 如文献[5]给出了实验室环境下 ISAIL 对转台目标的成像结果, 文献[6]给出了一种结合压缩感知理论的 ISAIL 成像算法。

ISAIL 极高的成像分辨率为目标精细微动特征的提取提供了新的途径。目标的微动指的是目标中某个部件机械的振动、旋转或其他微小的运动, 这些

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 60971100) 资助。

作者简介: 王 硕 (1974 -), 男, 讲师, 研究方向为信号与信息处理及计算机应用技术等。E-mail: y\_luo@139.com

收稿日期: 2010-12-27; 修订日期: 2011-01-25

微小的运动会回波信号产生调制作用,增加目标主体部分多普勒频率的边带信息,通常称之为微多普勒效应<sup>[7]</sup>。微多普勒效应体现了目标微动部件和主体部分的相互关系,可以为目标重建提供更多信息,对现有的成像方法是一种有效补充。目前,微多普勒特征提取技术已被广泛应用于雷达目标的检测、识别和重建等领域,V. C. Chen 等人较为系统地研究了目标加速、旋转、振动、翻滚状态下的微多普勒频移,并详细分析了高分辨时频分析方法在微多普勒信息提取中的应用<sup>[7-8]</sup>。文献[9]采用了 chirplet 分解方法来实现旋转部件回波信号与目标主体信号的分离,文献[10]则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。人体行走的雷达实测数据也得到了较为深入的研究,研究表明,通过提取人体行走时摆臂和呼吸时胸膛起伏产生的微多普勒特征来实现人体目标识别的技术途径是可行的<sup>[11]</sup>。

由于 ISAIL 能为小目标的识别提供有效足够的成像分辨率,因此研究基于 ISAIL 的微多普勒效应具有重要的意义。本文研究了 ISAIL 的回波信号特性,详细讨论了激光信号的大带宽和高载频对目标振动引起的微多普勒效应的影响,并通过仿真实验分析比较了基于 ISAIL 和微波波段 ISAR 的目标微多普勒效应,结果表明,与微波波段的 ISAR 相比,ISAIL 能有效反映小目标的微多普勒特征,为目标的鉴别识别提供足够的信息。

## 2 ISAIL 的微多普勒效应分析

### 2.1 ISAIL 成像理论

ISAIL 的成像过程与微波波段逆合成孔径雷达基本相同,但其发射的信号为激光波段的调频连续波进行成像,发射信号模型为:

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

其中,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形窗函数,即有  $\text{rect}(t/T_p) = 1$   $|t| \leq T_p/2$ ;  $0$   $|t| > T_p/2$ ,  $f_c$  表示信号的载频; $\mu$  表示信号的调频斜率; $T_p$  表示脉冲持续时间; $t_k$  表示脉冲持续时间内的快时间采样序列; $t_m$  是合成孔径上的慢时间采样序列; $t_m = mT_p$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $t = t_m + t_k$ , 点目标的回波信号可写为:

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

式中,  $\tau = 2R/c$  表示信号时延; $R$  表示目标与雷达的距离; $c$  是电磁波传播速度。

因为激光信号具有超大带宽,成像过程中对信

号的存储和处理都比较困难,此外,若目标与雷达距离较远,激光信号的相位信息也不能通过直接探测得到,因此 ISAIL 利用光外差探测方法进行成像,其参考信号为:

$$s_r(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau_r}{T_r}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c(t - \tau_r) + \frac{1}{2}\mu(t_k - \tau_r)^2\right)\right) \quad (3)$$

式中,  $\tau_r = 2R_{\text{ref}}/c$ ,  $R$  表示参考点与雷达的距离; $T_r$  是参考信号持续时间,一般比  $T_p$  略大。

与参考信号进行共轭相乘后,可得到:

$$s_f(t_k, t_m) = s_e(t_k, t_m) \cdot s_r^*(t_k, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t_k - \tau}{T_p}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_c(\tau - \tau_r)) \cdot \exp(-j2\pi\mu t_k(\tau - \tau_r)) \cdot \exp(j\pi\mu(\tau^2 - \tau_r^2)) \quad (4)$$

对式(4)进行快时间和慢时间域的二维傅里叶变换即可获得目标二维像,目标像的距离分辨率为:

$$\rho_R = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

式中,  $B$  表示信号带宽。

由于激光信号的带宽比微波信号大得多,ISAIL 的距离分辨率要比 ISAR 高很多,因此,ISAIL 可以提供提取小目标微动特征所需的微多普勒信息。

### 2.2 ISAIL 微多普勒特征

在大多数情况下,雷达目标并不能被看作刚体,当目标包含微动部件时,该部件的旋转/振动会给回波信号带来微多普勒效应。本文主要分析由目标振动引起的微多普勒效应。因为激光信号的超高频率和大带宽,ISAIL 的微多普勒效应与 ISAR 存在差异。

如图 1 所示,雷达位于坐标系原点,静止不动,目标初始位置位于点  $Q$  处,假设与雷达距离为  $R_0$ ,目标的方位角和俯仰角分别为  $\alpha_Q$  和  $\beta_Q$ 。散射点  $P$  以点  $Q$  为中心振动,振动幅度为  $r_p$ ,振动频率为  $\omega_p$ ,点  $P$  相对于点  $Q$  的方位角和俯仰角分别为  $\phi_p$  和  $\varphi_p$ 。目标相对于雷达速度为  $v_r$ ,点  $P$  和点  $Q$  的坐标为  $(r_p \cos\varphi_p \cos\phi_p \cos\alpha_Q \sin\beta_Q, r_p \sin\varphi_p \cos\alpha_Q \sin\beta_Q, R_0 \cos\beta_Q \cos\alpha_Q, R_0 \sin\beta_Q)$  和  $(R_0 \cos\beta_Q \cos\alpha_Q, R_0 \sin\beta_Q)$ 。

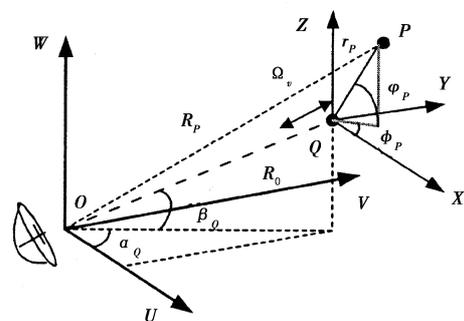


图 1 振动点模型

雷达与散射点  $P$  的距离为:

$$R_p = |\vec{R}_p| = \left[ (R_0 \cos\beta_Q \cos\alpha_Q + r_p \cos\varphi_p \cos\phi_p)^2 + (R_0 \cos\beta_Q \sin\alpha_Q + r_p \cos\varphi_p \sin\phi_p)^2 + (R_0 \sin\beta_Q + r_p \sin\varphi_p)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

若散射点  $Q$  的方位角和俯仰角都为零,则:

$$\begin{aligned} R_p &= R_{p0} + \nu_r t \\ &= (R_0^2 + r_p^2 + 2R_0 r_p \cos\beta_Q \cos\phi_p)^{1/2} + \nu_r t \\ &\approx R_0 + \nu_r t + r_p \cos\beta_Q \cos\phi_p \\ &= R_0 + \nu_r t + r_p \sin\omega_\nu t \cos\beta_Q \cos\phi_p \end{aligned} \quad (7)$$

当发射的信号是微波波段的线性调频信号时,若  $\nu_r \ll c$ ,则脉内快时间的影响可以忽略,式(7)可写为:

$$R_{p1} \approx R_0 + \nu_r t_m + r_p \sin\omega_\nu t_m \cos\beta_Q \cos\phi_p \quad (8)$$

代入式(4)可得:

$$\begin{aligned} s'_{f'}(t_k, t_m) &= \text{rect}\left(\left(t_k - \frac{2R'_{p1}}{c}\right)/T_p\right) \cdot \\ &\exp\left[-j\frac{4\pi}{c}\mu\left(t_k - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\Delta R\right] \cdot \\ &\exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta R\right] \exp\left[j\frac{4\pi\mu}{c^2}\Delta R^2\right] \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\Delta R = R_{p1} - R_{\text{ref}}$ , 式(9)中第一个相位项是距离项,第二个相位项是多普勒项,第三个相位项是视频残余项(RVP项)。

剔除 RVP 项后,对信号进行快时间的傅里叶变换,可以得到:

$$\begin{aligned} s'_f(f, t_m) &= T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{4\pi\mu}{c}\Delta R\right)\right) \cdot \\ &\exp\left[-j\frac{4\pi}{c}f_c\Delta R\right] \end{aligned} \quad (10)$$

如果可以得到目标和雷达距离的精确值  $R_{p1}$ , 则  $\Delta R = R_{p1} - R_{\text{ref}} = r_p \sin\omega_\nu t_m \cos\beta_Q \cos\phi_p$ , 在频率点  $f = -4\pi\mu\Delta R/c$  处,可以得到  $|s'_f(f, t_m)|$  的峰值,该点反映了微动散射点的位置。微多普勒频率可以从相位项中得到:

$$f_{m-D} = 2r_p \sin\omega_\nu t_m \cos\beta_Q \cos\phi_p / \lambda \quad (11)$$

从式(11)可以看出,目标的一维距离像中可以反映微动点的位置、频率和周期信息,以此实现基于微多普勒信息的目标重建。但是基于 ISAIL 发射的激光波段的调频连续波大带宽高载频特点,其脉内时间不可以忽略,此时,  $R_p$  必须写为:

$$R_{p2} = R_0 + \nu_r (t_m + t_k) + r_p \sin\omega_\nu (t_m + t_k) \cdot \cos\beta_Q \cos\phi_p = R_{p3} + \nu_r t_k \quad (12)$$

以  $R_{p2}$  代替式(9)中的  $R_{p1}$ , 可得:

$$\begin{aligned} s''_f(t_k, t_m) &= \text{rect}\left(\left(t_k - 2R_{p2}/c\right)/T_p\right) \cdot \\ &\exp(-j2\pi \cdot (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4)) \end{aligned} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= f_c \cdot \frac{2(R_{p3} - R_{\text{ref}})}{c} \\ \Phi_2 &= -\mu \cdot \frac{2(R_{p3}^2 - R_{\text{ref}}^2)}{c^2} \\ \Phi_3 &= \left(\frac{2\nu_r}{c}f_c + \mu \frac{2(R_{p3} - R_{\text{ref}})}{c} - \frac{4\mu R_{p3}\nu_r}{c^2}\right)t_k \\ \Phi_4 &= \left(\mu \frac{2\nu_r}{c} - \frac{1}{2}\mu \frac{4\nu_r^2}{c^2}\right)t_k^2 \end{aligned}$$

如果发射的信号是微波波段的,  $\Phi_3$  可以写为  $\Phi_3 = (2\mu(R_{p1} - R_{\text{ref}})t_k)/c$ ,  $\Phi_4$  可以忽略。但针对激光信号高载频和大带宽的特点,目标相对雷达的速度远小于电磁波传播速度,可以忽略,但由载频  $f_c$  和调频率  $\mu$  引起的不可忽略。在剔除视频残余相位并忽略目标速度引起的影响后,可以得到:

$$s''_{f'}(t_k, t_m) \approx \text{rect}\left(\frac{t_k - 2R_p/c}{T_p}\right) \cdot \exp(-j2\pi \cdot (\Phi'_1 + \Phi'_2 + \Phi'_3)) \quad (14)$$

式中,  $\Phi'_1 = f_c \cdot 2\Delta R'/c$ ,  $\Phi'_2 = (2\nu_r f_c/c + 2\Delta R'\mu/c) \cdot t_k$ ,  $\Phi'_3 = 2\nu_r \mu t_k^2/c$ ,  $\Delta R' = R_{p3} - R_{\text{ref}}$ 。

式中,第一个相位项是多普勒项,第二个是距离项,最后一个相位项是激光信号的大带宽引起的距离色散效应。这里的多普勒项不光与慢时间  $t_m$  有关,还与快时间  $t_k$  有关。对上式进行快时间的傅里叶变换,可以得到 ISAIL 的微多普勒频率:

$$\begin{aligned} f'_{m-D} &= 2f_c \cdot r_p \omega_\nu \cos\beta_Q \cos\phi_p \cos(t_m + t_k)/c + \\ &2\mu \cdot r_p \cos\beta_Q \cos\phi_p \sin\omega_\nu (t_m + t_k)/c + \\ &2\mu t_k \cdot r_p \omega_\nu \cos\beta_Q \cos\phi_p \cos\omega_\nu (t_m + t_k)/c \\ &= H \cdot \sin(t + \psi) \end{aligned} \quad (15)$$

式中,

$$H = \sqrt{(2\mu r_p A/c)^2 + (2f_c r_p \omega_\nu A/c + 2\mu t_k r_p \omega_\nu A/c)^2}, A = \cos\beta_Q \cos\phi_p; \psi = \arctan\left(\frac{2f_c r_p \omega_\nu A/c + 2\mu t_k r_p \omega_\nu A/c}{2\mu r_p A/c}\right), t = t_k + t_m。$$

从式(15)可以看出, ISAIL 的微多普勒特征信号仍然是一个正弦信号,  $H$  反映了距离-慢时间谱图中微动点的真实位置,真实的微动点位置必须依靠振动频率  $\omega_\nu$  来计算。可以看出,  $H$  是快时间  $t_k$  的函数,由于  $2\mu t_k r_p \omega_\nu A/c$  远小于  $2f_c r_p \omega_\nu A/c$ ,  $H$  可以写为:

$$H \approx \sqrt{(2\mu r_p A/c)^2 + (2f_c r_p \omega_\nu A/c)^2} \quad (16)$$

从式(16)中可以推出微动点的真实位置,进而实现基于微多普勒信息的目标重建。

由于激光信号的带宽极大,因此有可能出现系统采样率不足的情况,这时目标的微多普勒特征会发生卷绕。假设雷达的采样频率为  $F_s$ ,在不考虑脉内因素时,要实现经过外差处理后的回波信号的不失真采样,  $F_s$  要满足的最低要求是  $4\mu r/c$ 。但是,

在考虑了脉内因素后,要使微多普勒不发生卷绕,微动点的微动半径必须满足:

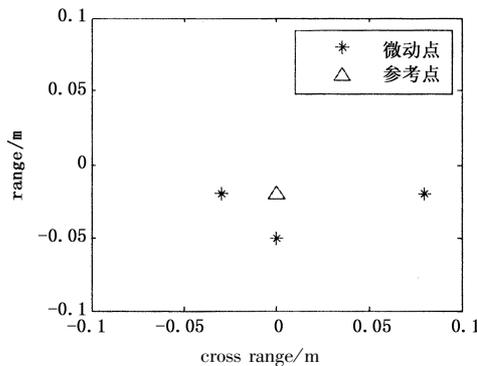
$$-\frac{cF_s}{4\sqrt{\mu^2 A^2 + f_c^2 \omega_v^2 A^2}} < r < \frac{cF_s}{4\sqrt{\mu^2 A^2 + f_c^2 \omega_v^2 A^2}} \quad (17)$$

如果不满足式(17)的条件,微动目标的微多普勒特征就会发生卷绕。

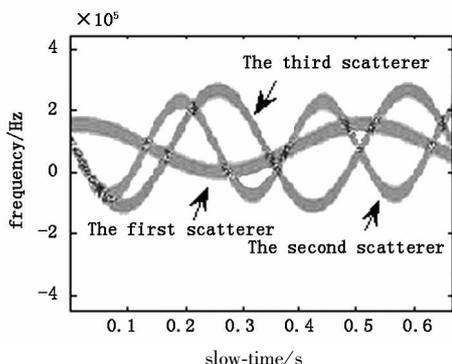
### 3 仿真分析

在这一节,仿真得到了基于距离-慢时间谱分析的 ISAIL 微多普勒特征信息,并与 X 波段雷达进行了比较。仿真过程由三部分组成:①仿真验证了 ISAIL 中振动引起的微多普勒效应;②仿真验证了 ISAIL 中的距离偏移和距离色散效应,并比较了基于 ISAIL 和基于微波波段 ISAR 的目标微多普勒特征的区别;③仿真验证了当采样率不足时,目标微多普勒特征出现的卷绕效应。

仿真中,ISAIL 发射信号采用  $3 \times 10^{13}$  Hz 的载频,带宽为 20 GHz,脉冲持续时间为 300  $\mu$ s,目标与雷达的初始距离为 10 km。目标模型由三个振动点组成,目标的径向速度和横向速度分别为 200 m/s,三个振动点围绕点(0, -0.02)处的散射点振动,振幅分别为 0.03 m,0.03 m 和 0.08 m,振动频率分别为 2 Hz,4 Hz 和 3 Hz,初相分别为 0,  $\pi/2$  和  $\pi/2$ 。图 2(a) 是目标散射点模型,图 2(b) 是 ISAIL 的频率-慢时间谱图。



(a) 目标散射点模型



(b) 时频平面图

图 2 ISAIL 中的微多普勒信息

如图 2 所示,ISAIL 的频率-慢时间谱图为三个振动点的微多普勒特征,它们表现为正弦曲线,反映了振动点的位置信息。前两个散射点虽然振幅相同,但振动频率不同,在频率-慢时间谱图中可以看出明显的三条正弦曲线,这是由连续波信号在时间上连续的特点决定的。受到激光信号超大带宽和超高载频的影响,振动点的频率-慢时间谱图中显示的信息并不能反映目标的真实距离位置,应从谱图中检测  $H$  和  $\omega_v$  的信息,再利用式(16)计算出目标真实位置。

从图 3 可以看出,目标散射点模型有距离偏移和明显的色散效应出现,这是由相位项  $\Phi'_3$  引起的。这种现象将会影响目标重建中的微多普勒信息采集过程,因此,在提取 ISAIL 目标的微多普勒特征之前,必须对回波信号进行脉内运动补偿和距离偏移校正。

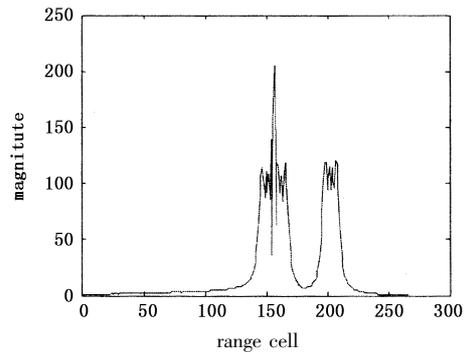


图 3 目标一维距离像

进一步对基于微波波段 ISAR 的目标微多普勒特征进行分析,假设雷达发射信号采用  $3 \times 10^{10}$  Hz 的载频,带宽为 2 GHz,脉冲持续时间为 3  $\mu$ s,目标与雷达的初始距离为 10 km。目标参数不变。则得到的目标微多普勒特征如图 4 所示,可以看出,当目标的振幅较小时,微波波段 ISAR 已经不能提供足够高的分辨率完成对目标微多普勒特征的识别和提取,这限制了它们在提取目标微小运动特征时的作用。

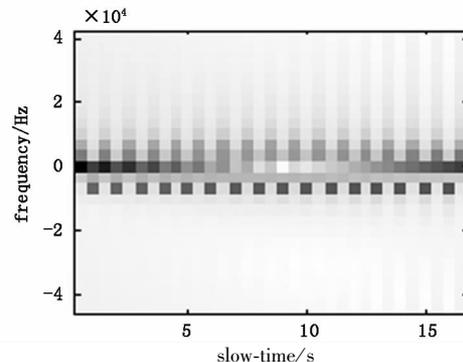


图 4 基于微波 ISAR 的振动点微多普勒特征

假设雷达参数与仿真 1 一致,将最后一个振动

点的振幅由 0.08 m 改为 0.12 m, 得到的目标频率-慢时间谱图和一维距离像如图 5 所示。可以看出, 当振幅较大而采样率不足时, 基于 ISAIL 的目标微多普勒特征会出现卷绕。因此, 在提取目标微多普勒特征时, 需要根据目标微多普勒特征可能出现的卷绕重新构建参数方程才能准确地获得目标的频偏。

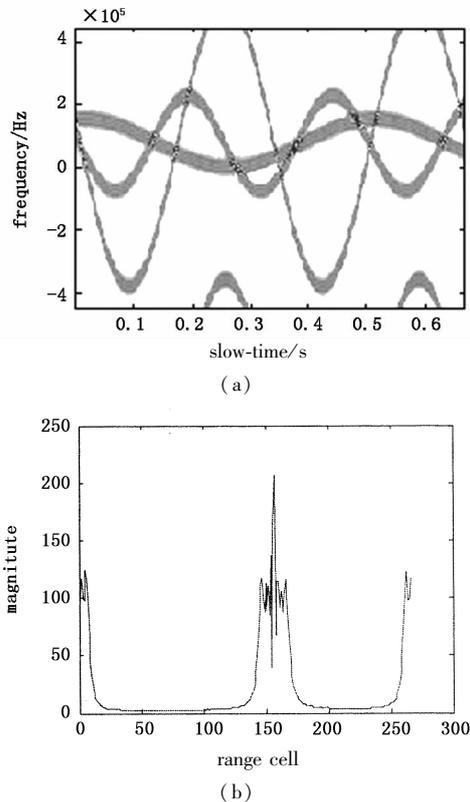


图5 采样率不足时 ISAIL 目标的微多普勒特征

#### 4 结论

本文讨论了 ISAIL 成像中目标振动部分引起的微多普勒效应, 仿真结果显示, 在振动幅度微小时, 振动散射点仍可以在谱图中明显反映出来, 但是由于激光信号的超大带宽和超高载频, 以及连续波信号必须考虑脉内快时间影响等原因, 目标的微多普勒特征会出现距离偏移和色散效应, 这会给目标微动参数的提取以及后续的成像过程造成困难。因而, 下一步的工作重点是完成 ISAIL 的脉内运动补偿, 我们会在后续的工作中对此进行更加深入的研究。

#### 参考文献:

[1] He Jin, Luo Ying, Feng Tongan, et al. Inverse synthetic imaging LIDAR: no targets can hide [C]. Workshop for

Space, Aeronautical and Navigational Electronics, Shanghai, China, 2009: 177 - 181.

- [2] Yang Xiaoyou, Chi Long, He Jin, et al. Imaging algorithm for inverse synthetic aperture LIDAR [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 904 - 909. (in Chinese)  
杨小优, 池龙, 何劲, 等. 一种逆合成孔径激光雷达成像算法[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 904 - 909.
- [3] Bashkansky M, Lucke R L, Funk E, et al. Two dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. Opt. Lett, 2002, 27(22): 1983 - 1985.
- [4] Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle, et al. Research progress on the laser range-resolved doppler imaging radar and its key technologies [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5): 464 - 467. (in Chinese)  
王明军, 吴振森, 李应乐, 等. 激光雷达距离高分辨多普勒成像技术研究进展及关键技术[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 464 - 467.
- [5] Guo L, Xing M D, Zhang L, et al. Research on indoor experimentation of range SAL imaging system [J]. Sci China Ser E-Tech Sci, 2009, 52(10): 3098 - 3104.
- [6] Zang Bo, Zhang Lei, Tang Yu, et al. Study on sparse aperture of inverse synthetic aperture imaging lidar with low SNR [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2808 - 2813. (in Chinese)  
臧博, 张磊, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达低信噪比稀疏孔径成像方法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2808 - 2813.
- [7] Chen V C, Li F, Ho S S. Analysis of micro-doppler signatures [J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [8] Chen V C. Analysis of radar micro-doppler signature with time-frequency transform [C]. Proceedings of the 10<sup>th</sup> IEEE Statistical Signal and Array Processing, 2000: 463 - 466.
- [9] Li J, Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts [J]. IEEE Proc. Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284 - 291.
- [10] 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 Trans. Geosci. Remote Sens, 2008, 46(1): 291 - 299.
- [11] Thayaparan T, Abrol S, Riseborough E, et al. Analysis of radar micro-doppler signatures from experimental helicopter and human data [J]. IET Radar Sonar Navig, 2007, 1(4): 289 - 299.