

# 基于 ATI 技术和 Radon 变换的振动目标微多普勒提取

张 伟<sup>1</sup>, 童创明<sup>1,3</sup>, 张 群<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077;  
3. 毫米波国家重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘 要:** 针对地杂波背景下地面振动目标的时变微多普勒特征提取问题, 提出了一种基于距离向压缩数据域双通道 ATI 干涉和 Radon 变换的提取方法. ATI 相位对消用于抑制地杂波, 获取振动目标的干涉信号, 其在距离向压缩数据域呈现为沿方位向的直线; Radon 变换则用于检测这些微弱直线分量, 并确定它们所在的距离单元. 详细推导了目标沿不同方向振动引入的微多普勒参数化表达式. 与单通道模式相比, 该方法无需补偿雷达平动引起的多普勒频移, 且可有效检测沿方位向振动的目标, 其微多普勒谱的显著特征是呈非周期性变化. 数值仿真验证了该方法的正确性和有效性.

**关键词:** 微多普勒; 杂波抑制; 沿航迹干涉技术; Radon 变换

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 10-2431-06

## Micro-Doppler Extraction of Vibrating Target Based on ATI Technique and Radon Transform in SAR

ZHANG Wei<sup>1</sup>, TONG Chuang-ming<sup>1,3</sup>, ZHANG Qun<sup>2</sup>

(1. Missile Institute, AFEU, Sanyuan, Shaanxi 713800, China;  
2. Institute of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an, Shaanxi 710077, China;  
3. State Key Lab of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** Aiming at extracting the time-varying micro-Doppler feature of the vibrating target in ground clutter environment, the method of micro-Doppler extraction based on dual-channel ATI technique and Radon transform is presented. The ATI technique is utilized to suppress ground clutter and obtain the interferometric signal of the vibrating target, which is presented as a straight line along the azimuth direction in the range-compressed data domain. The Radon transform is utilized to detect the weak straight line and find out which range cell it locates at. And the mathematical expressions of micro-Doppler with different vibrating directions are derived and discussed in detail. Compared with the single-channel situation, it is no need to compensate for the Doppler shift caused by the radar's translation, and the target vibrating along the azimuth direction could be effectively detected, whose micro-Doppler presents remarkably nonperiodic feature. Simulated results verify the accuracy and availability of the proposed method.

**Key words:** micro-Doppler; clutter suppression; along-track interferometry (ATI); Radon transform

## 1 引言

目标微动会对雷达回波信号产生附加的频率调制, 产生以目标主体多普勒频率为中心的边带, 这种由于振动或旋转等运动引起的调制称为“微多普勒 (Micro-Doppler) 现象”<sup>[1,2]</sup>. 目前的工作大多基于 ISAR 成像技术, 着重研究微多普勒信息的分离与提取<sup>[3]</sup>, 微动多目标分辨<sup>[4]</sup>, 微动目标聚焦成像<sup>[5]</sup>以及相关的实验研究<sup>[6]</sup>等问题.

基于 SAR 成像技术的微多普勒研究方面, 文献[7]详细分析了 SAR 场景中目标振动产生的微多普勒调

制, 并从 X 波段 SAR 雷达实验数据中成功提取到了振动角散射器(振动频率 2Hz, 幅度 1.5mm)的微多普勒特征. M. Rüegg 等人<sup>[8]</sup>利用毫米波段雷达在空旷的停机坪上采集到了卡车引擎振动(振动频率 32Hz, 幅度 0.1mm)的 SAR 回波数据, 并由时频分析提取了其微多普勒谱. 然而, 这些研究基本上没有考虑地杂波对微多普勒特征提取的影响. 通常来说, 我们所关心的目标(如坦克和军用车辆引擎的振动, 地基或舰载对空监视雷达天线的转动等)大多处在地杂波较强的环境中, 因此研究基于地杂波抑制的地面微动目标特征提取就显得很有意义. 文献[9, 10]基于 ISAR 成像技术, 分别利用陷波滤波器

(notch filter)和一次相消技术提取了人体微动和目标旋转部件产生的微多普勒信息.然而,基于 SAR 成像技术的地杂波抑制和动目标检测(GMTI)一般是针对地面慢速运动目标,对地面微动目标的研究尚不多见.

目前,在 SAR/GMTI 中,比较常用且工程上易于实现的多通道杂波抑制技术主要有相位中心偏置(DPCA)技术<sup>[11]</sup>,沿航迹干涉(ATI)技术<sup>[12]</sup>等.本文以地面振动目标为研究对象,提出了一种基于距离向压缩数据域双通道 ATI 技术和 Radon 变换相结合的微多普勒提取方法.ATI 技术用于地杂波抑制,以获取目标振动产生的干涉信号,且此信号在距离向压缩数据域呈现为沿方位向的直线.由于只对信号作了距离向压缩,未作方位向压缩处理,目标能量较为分散<sup>[13]</sup>,特别是当目标后向散射系数、振动幅度或频率较小时,干涉信号的虚部幅值要小得多,此时可借助于 Radon 变换检测这些微弱直线分量,以确定微动目标所在的距离单元.

根据振动方向的不同,将目标分为斜振、沿距离向振动和沿方位向振动三类情况讨论,详细推导了不同情况下的微多普勒参数化表达式.受双通道 ATI 相位差分处理影响,该方法不需要预先对干涉信号作雷达平动补偿,并可有效解决单通道模式下不能检测沿方位向振动目标的问题,且该类目标的微多普勒谱呈非周期性变化特征.

## 2 双通道 ATI 原理分析

### 2.1 分析模型

类似于双通道 DPCA 技术,ATI 技术同样要求沿航迹放置两个天线,每个天线都有一个独立的接收通道,以固定距离  $d$  分开.与其不同的是,ATI 方法实质上是相位对消,而不是幅度对消.

如图 1 所示,本文采用单发单收,两天线交替发射和接收的工作模式.两天线相位中心间距  $d$ . 载机速度  $v$ 、系统脉冲重复周期  $T$  三者之间满足关系:  $d = mvT$  ( $m = 1, 3, 5 \dots$ ).

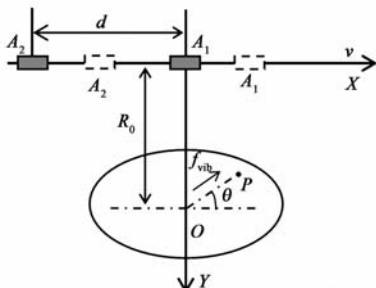


图1 单基双通道ATI工作原理示意图

### 2.2 距离向压缩数据域杂波抑制

为便于分析起见,建立以下散射点模型:假设场景内有振动散射点  $P$  和静止散射点  $O$ ; 散射点  $P$  以  $O$  为

中心作正弦形式的振动,振动方向与  $X$  轴夹角为  $\theta$ , 振动频率和幅度分别为  $f_{\text{vib}}$ ,  $a_{\text{vib}}$ .

假设在方位向慢时间  $\tau_0$  时刻,天线  $A_1$  的坐标为  $(v\tau_0, 0)$ , 天线  $A_2$  的坐标为  $(v\tau_0 - d, 0)$ . 航迹到静止散射点  $O$  的最近距离为  $R_0$ , 则振动散射点的坐标为

$$\begin{cases} x(\tau_0) = a_{\text{vib}} \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0) \cos(\theta) \\ y(\tau_0) = R_0 - a_{\text{vib}} \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0) \sin(\theta) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\omega_{\text{vib}} = 2\pi f_{\text{vib}}$  为振动角频率. 此时天线  $A_1$  到振动散射点  $P$  的单程距离为

$$R_1(\tau_0) = \sqrt{(v\tau_0 - x(\tau_0))^2 + y(\tau_0)^2} \quad (2)$$

按照泰勒级数展开式(2)并忽略高次项,可被重新表示为

$$R_1(\tau_0) \approx R_0 + \frac{1}{2R_0} (v\tau_0 - x(\tau_0))^2 - a_{\text{vib}} \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0) \sin(\theta) \quad (3)$$

同理可得在  $\tau_0 + mT$  时刻,天线  $A_2$  到振动散射点  $P$  的单程距离为

$$R_2(\tau_0 + mT) \approx R_0 + \frac{1}{2R_0} (v(\tau_0 + mT) - d - x(\tau_0 + mT))^2 - a_{\text{vib}} \cos(\omega_{\text{vib}}(\tau_0 + mT)) \sin(\theta) \quad (4)$$

假设  $p(t)$  为雷达发射的线性调频信号,即

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cdot \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (5)$$

其中当  $-1/2 \leq t \leq 1/2$  时,  $\text{rect}(t) = 1$ ,  $f_c$  是载频,  $T_p$  是脉冲宽度,  $\mu$  是调频率,  $t$  表示距离向快时间. 则通道  $A_1, A_2$  所接收信号经相干检波和距离压缩后的基带信号分别为

$$s_1(\tau_0) = C_0 \exp\left(-j \frac{4\pi R_1(\tau_0)}{\lambda}\right) \quad (6)$$

$$s_2(\tau_0 + mT) = C_0 \exp\left(-j \frac{4\pi R_2(\tau_0 + mT)}{\lambda}\right) \quad (7)$$

式中,常数  $C_0$  由目标的后向散射系数和天线的双程方向图决定. 在  $d = mvT$  满足的条件下,对两路基带回波信号作 ATI 干涉处理,即

$$\begin{aligned} s &= s_1^*(\tau_0) s_2(\tau_0 + mT) \\ &= C_0^2 \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} (R_1(\tau_0) - R_2(\tau_0 + mT))\right) \end{aligned} \quad (8)$$

将式(3),(4)代入式(8),并逐步推导可得

$$s = C_0^2 \exp\left(-j \frac{8\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\omega_{\text{vib}} mT}{2}\right) \sin\left(\frac{2\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \omega_{\text{vib}} mT}{2}\right) \cdot \left(\frac{a_{\text{vib}} v \cos(\theta)}{R_0} \tau_0 + a_{\text{vib}} \sin(\theta)\right)\right) \quad (9)$$

由式(9)可知,对于静止目标( $\omega_{\text{vib}}$  和  $a_{\text{vib}}$  均为零),其干涉信号  $s$  的相位为零,即信号虚部为零;对于振动目标( $\omega_{\text{vib}}$  和  $a_{\text{vib}}$  均不为零),其干涉信号相位不为零,即其虚部不为零(在此不考虑  $\sin(\omega_{\text{vib}} mT/2) = 0$  的情况).

也就是说,ATI 相位对消处理使地杂波得到抑制,而振动目标干涉信号得以保留,由此可检测微动目标。

### 3 微多普勒

由式(9)可知,ATI 处理后干涉信号  $s$  的相位为

$$\varphi = -\frac{8\pi}{\lambda} \cdot \sin\left(\frac{\omega_{\text{vib}} mT}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \omega_{\text{vib}} mT}{2}\right) \cdot \left(\frac{a_{\text{vib}} v \cos(\theta)}{R_0} \tau_0 + a_{\text{vib}} \sin(\theta)\right) \quad (10)$$

由式(10)对慢时间  $\tau_0$  求导数,可得瞬时多普勒频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(\tau_0)}{d\tau_0} = -\frac{4}{\lambda} \sin(\pi f_{\text{vib}} mT) \cdot \left( \frac{va_{\text{vib}} \cos(\theta)}{R_0} \sin(\pi f_{\text{vib}} (2\tau_0 + mT)) + \omega_{\text{vib}} \left( \frac{va_{\text{vib}} \cos(\theta)}{R_0} \tau_0 + a_{\text{vib}} \sin(\theta) \right) \cos(\pi f_{\text{vib}} (2\tau_0 + mT)) \right) \quad (11)$$

区别于单通道模式下的瞬时多普勒频率<sup>[8]</sup>,式(11)中不再包含由雷达平动引起的多普勒频移项,而只有目标振动引入的微多普勒项,且其由随慢时间变化的正余弦函数叠加而成.依据振动方向  $\theta$  的不同,详细讨论如下:

(1)  $\theta = 0\text{rad}$ ,即目标沿方位向振动,此时式(11)可以简化为

$$f \approx -\frac{4va_{\text{vib}}}{\lambda R_0} \sin(\pi f_{\text{vib}} mT) \cdot (\sin(\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \pi f_{\text{vib}} mT) + \omega_{\text{vib}} \tau_0 \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \pi f_{\text{vib}} mT)) \quad (12)$$

上式括号中的第一项是以  $1/f_{\text{vib}}$  为周期的正弦函数,第二项是非周期函数.由于目标的振动频率在 10Hz 量级,受此影响括号中的第二项一般要大于第一项,在微多普勒调制中占主导地位,因此式(12)是随慢时间变化的非周期性复合函数,且在形式上类似于函数  $f(x) = kax \cos(ax) + l$ . 尽管受距离项  $R_0$  的影响,目标沿方位向振动引起的微多普勒频移相对较小,却可有效解决单通道模式下对此类目标不能检测的问题(单通道模式下,此类目标的微多普勒频移为 0,且在静止目标图像上呈聚焦像<sup>[8]</sup>).

(2)  $\theta = \pi/2\text{rad}$ ,即目标沿雷达视线方向振动,此时式(11)可以简化为

$$f \approx -\frac{4a_{\text{vib}} \omega_{\text{vib}}}{\lambda} \sin(\pi f_{\text{vib}} mT) \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \pi f_{\text{vib}} mT) \quad (13)$$

式(13)表明,此类目标的微多普勒是随慢时间变化

的余弦周期函数(周期为  $1/f_{\text{vib}}$ ),且微多普勒频移不仅与目标微动参数、发射波长有关,而且受一个与双通道基线长度和脉冲重复频率有关的正弦因子调制。

(3)  $\theta$  在  $\pm(0, \pi/2)\text{rad}$  区间内取值,此时目标斜振.对于机载雷达而言,距离项  $R_0$  一般在 km 量级,载机速度在百米量级,若  $\theta$  取值满足

$$\frac{v |\cos(\theta)|}{R_0} \ll |\sin(\theta)| \quad (14)$$

则式(11)可以简化为

$$f \approx -\frac{4a_{\text{vib}} \omega_{\text{vib}} \sin(\theta)}{\lambda} \sin(\pi f_{\text{vib}} mT) \cos(\omega_{\text{vib}} \tau_0 + \pi f_{\text{vib}} mT) \quad (15)$$

此时,其微多普勒调制函数仍然是随慢时间变化的周期函数(周期为  $1/f_{\text{vib}}$ ),当  $\theta$  逼近或等于  $\pi/2\text{rad}$  时,则其微多普勒可由式(13)近似求得.若  $\theta$  取值很小或逼近于 0,式(14)不再成立,此时可近似看作沿方位向振动目标,则其微多普勒可由式(12)近似求得。

在正侧视模式下,忽略距离弯曲或对其校正后,静止目标的回波包络在距离向压缩数据域表现为沿方位向的直线;对于地面振动目标,其振动幅度一般在 mm 量级,远小于 SAR 的距离分辨率,不会发生越距离单元徙动现象,因此其回波在距离向压缩数据域同样表现为沿方位向的直线.由于未对信号作方位向压缩处理,目标能量较为分散,特别是当目标振动幅度较小或沿方位向振动时,干涉信号虚部幅值要小得多,导致其在距离向压缩数据域的位置比较模糊,因此关键问题是如何检测和定位这些微弱直线分量。

### 4 Radon 变换

Radon 变换<sup>[13]</sup>是一种直线积分的投影变换,可用来检测二维平面上的直线分量.设  $f(x, y)$  为二维平面  $(x, y)$  上的任一函数,则其 Radon 变换可表示为

$$R(\rho, \varphi) = \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \varphi - y \sin \varphi) dx dy \quad (16)$$

式中  $\delta(\cdot)$  表示狄拉克函数。

如图 2 所示,由于  $\delta(\cdot)$  的作用, Radon 变换沿着直线  $y = ax + b$  ( $a = -1/\text{tg}\theta_0$ ,  $b = -\rho_0/\sin\theta_0$ ) 积分,其中  $\rho_0$  是二维平面  $(x, y)$  的原点到该直线的距离,  $\theta_0$  是直线与  $x$  轴之间的夹角,将二维平面  $(x, y)$  内的直线映射到  $(\rho, \theta)$  平面内的一个峰点,其在沿角度  $\theta_0$  的截面上

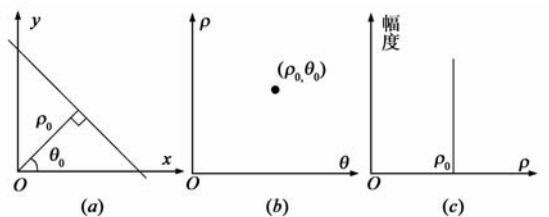


图2 Radon变换原理示意图

表现为类似于图 2(c) 的形式。

由于在距离向压缩数据域振动目标表现为沿方位向的直线, 所以干涉信号的 Radon 变换在  $\theta_0 = 90^\circ$  截面上各个聚集的峰值就表示在原二维数据域中相应距离单元处有振动目标, 对相应距离单元处的方位向信号作时频变换即可获得其微多普勒谱。综上所述, 图 3 给出了本文方法的具体操作流程。

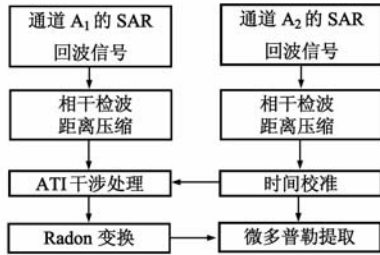


图3 基于双通道ATI和Radon变换的微多普勒提取流程

## 5 仿真实验

仿真实验中, 雷达参数设置如下: 雷达载频  $f_c = 94\text{GHz}$  ( $\lambda = 3.19\text{mm}$ ), 带宽  $B = 200\text{MHz}$ , 发射信号为脉宽  $T_p = 1.2\mu\text{s}$  的线性调频信号, 载机运动速度  $v = 75\text{m/s}$ , 系统脉冲重复频率  $\text{PRF} = 3840\text{Hz}$ , 两个天线相位中心间距  $d = 25vT$ , 航迹到场景中心的最近距离  $R_0 = 3\text{km}$ . 雷达以正侧视方式工作, 系统的距离向和方位向分辨率分别为  $d_r = 0.75\text{m}$  和  $d_a = 0.08\text{m}$ , 经计算距离弯曲项  $R_q = \lambda^2 R_0 / (32 d_a^2) < d_r / 4$ , 因此距离弯曲可以忽略。

假设场景内有 8 个静止散射点以及 3 个模拟角散射器的振动散射点, 静止散射点的后向散射系数均取

为 1.5. 斜向振动散射点  $P_1$  的参数为:  $f_1 = 10\text{Hz}$ ,  $a_1 = 5\text{mm}$ ,  $\theta_1 = \pi/3\text{rad}$ , 后向散射系数  $\sigma_1 = 0.9$ ; 沿雷达视线方向振动的散射点  $P_2$  的参数为:  $f_2 = 15\text{Hz}$ ,  $a_2 = 0.1\text{mm}$ ,  $\theta_2 = \pi/2\text{rad}$ ,  $\sigma_2 = 0.8$ ; 沿方位向振动的散射点  $P_3$  的参数为:  $f_3 = 7\text{Hz}$ ,  $a_3 = 60\text{mm}$ ,  $\theta_3 = 0\text{rad}$ ,  $\sigma_3 = 1$ . 经计算距离压缩前每个通道的信杂比 (signal clutter ratio, SCR) 约为  $-8.93\text{dB}$ . ATI-Radon 方法的仿真结果如图 4 所示, 其中 (a) 和 (b) 分别是通道  $A_1$  所接收基带信号和两通道 ATI 杂波对消信号的虚部模值。(c) 是杂波对消信号虚部模值的 Radon 变换在  $\theta_0 = 90^\circ$  截面上的分布。

由图 4(a) 可见, 通道  $A_1$  的回波信号中同时包含地杂波和微动目标信息, 从两类信号的包络来看都呈现为沿方位向的直线, 不能分辨开来。经两通道 ATI 对消处理后, 图 4(b) 中仅包含微动目标信息, 然而受散射点的微动参数、后向散射系数等因素影响, 其中一个目标所处的位置尤为模糊。由图 4(c) 所示, 在  $\theta_0 = 90^\circ$  截面上有 3 个峰值, 峰值中心分别位于第 309、320 和 330 个距离单元处, 恰好对应仿真实验中散射点  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_1$  的设定位置, 可以看到由于  $P_2$  的振幅远小于其它散射点, 所以其峰值幅度要小得多。需要说明的是, 实际中为尽量降低系统噪声的影响, 可通过对 Radon 变换后的归一化幅度设定阈值滤波以便于确定峰值的个数和位置。

考虑到 Gabor 变换没有自交叉项, 而且具有良好的时间和频率分辨率, 因此后续仿真中均由它来完成时频变换。图 5(a) ~ 5(c) 分别为散射点  $P_2$ 、 $P_3$  和  $P_1$  的 Gabor 变换微多普勒谱及理论计算值。

由图 5(a) 可见, 沿雷达视线方向振动目标  $P_2$  的

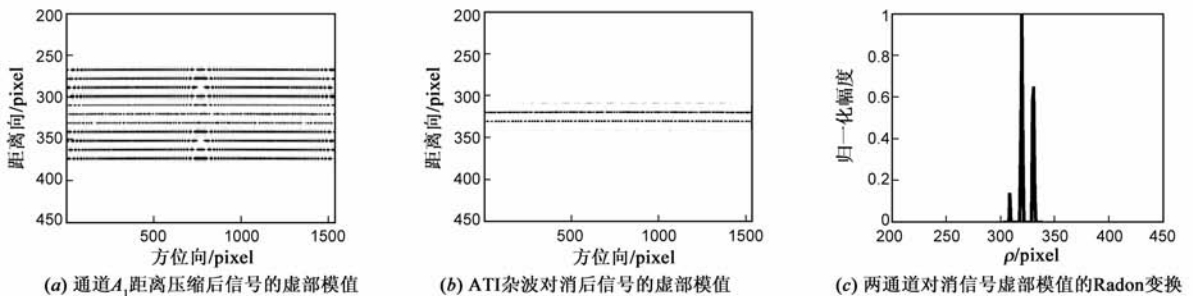


图4 ATI-Radon方法的仿真结果

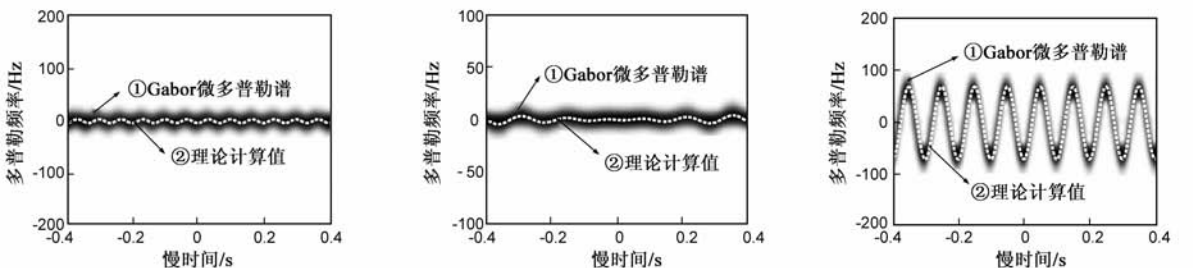


图5 各振动散射点的微多普勒谱图

Gabor 变换微多普勒谱呈余弦变化形式,与理论计算值相吻合;受其振幅较小的影响,微多普勒变化幅度也相对较小(实际上就是微多普勒带宽较小,微多普勒带宽为式(13)所示微多普勒频率最大值的两倍).由图 5(b)可见,沿方位向振动目标  $P_3$  的微多普勒调制呈非周期性变化形式,与理论计算值相吻合;尽管其振幅和频率相对较大,但受距离项  $R_0$  影响其微多普勒带宽也较小.由图 5(c)可见,由于参数设定满足式(14),故其微多普勒谱呈现为余弦函数变化形式,与理论计算值相吻合,其微多普勒带宽也明显大于前两者.

对于时频分布呈余弦函数变化特征且微多普勒带宽相对较大的情况,可由其微多普勒谱二维自相关函数<sup>[14]</sup>来估计目标的振动频率.图 6 为目标  $P_1$  的微多普勒谱自相关函数分布,可以确定该目标的振动周期为 0.1s,即振动频率为 10Hz,与其真实值相一致.

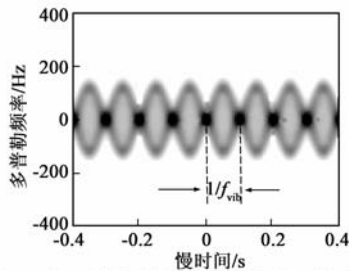


图6 目标 $P_1$ 微多普勒谱的自相关函数分布

而对于时频分布呈余弦函数变化特征且微多普勒带宽相对较小,以及时频分布呈非周期性变化特征等两类情况,求自相关函数分布的方法不再适用.此时可借鉴文献[15]中时频骨架线提取并通过曲线拟合的方法来估计目标的微动参数.对于目标  $P_2$  其时频分布呈余弦分布,可以采用三角函数进行拟合;对于目标  $P_3$  其时频分布呈非周期性变化,根据第 3 节中的理论分析,其拟合函数可设为  $f(\tau) = k\omega\tau \cos(\omega\tau + \varphi) + l$ .以目标  $P_3$  为例,经计算其振动频率拟合值  $f_{es} \approx 6.92\text{Hz}$ ,与给定值相差不大,从而验证了理论分析的正确性.

前面主要分析了目标振幅、振动方向对特征提取的影响,接下来从两方面来简要阐述振动频率对特征提取的影响.仿真实验中相干积累时间为 0.8s,沿距离向振动目标为例:一方面,若要获取周期性完整的微多普勒谱,则振动频率最小为 1.25Hz,如果小于此值将不利于微动目标检测;另一方面,在振幅一定的情况下,频率越大,微多普勒带宽也就越大,由此可能出现微多普勒混叠现象,即雷达系统脉冲重复频率 PRF 小于微多普勒带宽,发生欠采样现象,文献[16]中已对此做了较为详细的仿真,在此不再赘述.实际中,受限于振动目标的频率和振幅,以上两种情况发生的概率是比较小的.

## 6 结论

基于 SAR 成像模式,本文提出了一种在地杂波背景下利用双通道 ATI 技术和 Radon 变换在距离向压缩数据域提取地面振动目标微多普勒信息的方法,并由理论分析和仿真验证了目标沿不同方向振动的微多普勒特征.研究表明,在 ATI 相对对消抑制地杂波的基础上,该方法有助于在距离向压缩数据域检测微弱振动目标干涉信号,并可有效提取沿方位向振动目标的微多普勒谱.该方法对单通道 SAR 模式下的微动目标雷达特征提取是一个很好的补充,为相关军事目标的检测与识别打下了良好的基础.

## 参考文献

- [1] V C Chen, F Li, S S Ho, et al. Micro-Doppler effect in Radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2-21.
- [2] 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)
- [3] Qun Zhang, T S Yeo, H S Tan, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the hough transform[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [4] 关永胜,左群声,刘宏伟.高噪声环境下微动多目标分辨[J].电子与信息学报,2010,32(11):2630-2635.  
Guan Yong-sheng, Zuo Qun-sheng, Liu Hong-wei. Micro-motion targets resolution in a high noise environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 2(11): 2630-2635. (in Chinese)
- [5] 白雪茹,周峰,邢孟道,等.空中微动旋转目标的二维 ISAR 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)
- [6] 刘进,王雪松,马梁,等.空间进动目标动态散射特性的实验研究[J].航空学报,2010,31(5):1014-1023.  
Liu Jin, Wang Xue-song, Ma Liang, et al. Experimental study on dynamic scattering properties of space precession target[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(5): 1014-1023. (in Chinese)
- [7] T Sparr, P Krane. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR[J]. IEE Proceedings of Radar Sonar Navigation, 2003, 150(4): 277-283.
- [8] M Rügge, E Meier, D Nüesch. Vibration and rotation in Millimeter-Wave SAR[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote

- Sensing, 2007, 45(2): 293 – 304.
- [9] V C Chen. Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions [J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 291 – 300.
- [10] 罗迎, 张群, 封同安, 等. 强杂波下含旋转部件的目标成像及微多普勒提取 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 261 – 264.  
Luo Ying, Zhang Qun, Feng Tong-an, et al. Imaging and micro-Doppler extraction of targets with rotating parts in strong ground clutter [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 261 – 264. (in Chinese)
- [11] C E Muehe, M Labitt. Displaced-phase-center antenna technique [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 281 – 296.
- [12] S Suchandt, H Runge, H Breit, et al. Automatic extraction of traffic flows using TerraSAR-X along-track interferometry [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 807 – 819.
- [13] 高飞, 毛士艺, 袁运能, 等. 基于原始数据域的星载双通道 SAR-GMTI 研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(12): 2105 – 2110.  
Gao Fei, Mao Shi-yi, Yuan Yun-neng, et al. Study on raw data-based two aperture spaceborne SAR-GMTI [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12): 2105 – 2110. (in Chinese)
- [14] J Li, H Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating part [J]. IEE Proceedings of Radar Sonar Navigation, 2003, 150(4): 284 – 291.
- [15] 丁小峰, 魏玺章, 胡杰民, 等. 弹道中段目标多普勒成像算法研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2864 – 2868.  
Ding Xiao-feng, Wei Xi-zhang, Hu Jie-min, et al. The research on doppler-only imaging algorithm of the mid-course

missile object [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2864 – 2868. (in Chinese)

- [16] 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-gui, 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)

### 作者简介



张 伟 男, 1983 年生, 博士研究生, 研究方向: 雷达信号与信息处理.

E-mail: zwtigers@163.com



童 创 明 男, 1964 年生, 教授、博士生导师、空军级专家. 研究方向: 电磁散射逆散射、超宽带技术以及雷达目标识别.

E-mail: cmtong@126.com



张 群 男, 1964 年生, 教授、博士生导师、IEEE Senior Member. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像和电子对抗.

E-mail: zhangqunus@gmail.com