

## 含旋转部件目标双基地 ISAR 微动特征提取及成像研究

朱仁飞<sup>①</sup> 张群<sup>①②</sup> 罗迎<sup>①</sup> 朱小鹏<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(空军工程大学电讯工程学院 西安 710077)

<sup>②</sup>(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:** 由于空间的高度复杂性, 双基地雷达系统中目标微动产生的微多普勒信息与单基地体制雷达有较大区别。该文以含旋转结构部件目标为例, 推导了双基地 ISAR 系统中目标微动产生的微多普勒效应, 并详细分析了其在距离-慢时间 2 维谱图域内的表现形式及特点。针对双基地雷达收、发分置的特殊空间结构的影响, 修正了基于扩展 Hough 变换的目标微动信息谱图域提取方法, 并通过仿真验证了修正方法在双基地体制 ISAR 成像系统中的有效性。

**关键词:** 双基地雷达; ISAR; 微多普勒; Hough 变换; 旋转部件

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)10-2359-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00677

## Study on Micro-motion Feature Extraction and Imaging of Target with Rotating Parts in Bistatic ISAR

Zhu Ren-fei<sup>①</sup> Zhang Qun<sup>①②</sup> Luo Ying<sup>①</sup> Zhu Xiao-peng<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

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

**Abstract:** Compared with the monostatic radar, micro-Doppler effect in bistatic radar has many differences due to its spatial complexity. In this paper, micro-Doppler effect of target with rotating parts is derived in the bistatic ISAR system. Characteristics and manifestation of micro-motion part in the range-slow-time plane is also analyzed. According to the effect produced by the system's spatial relationship, a modified extended Hough transform is proposed to extract the micro-motion information from the range-slow-time plane. Simulations verify the correctness and effectiveness of the method in bistatic ISAR system.

**Key words:** Bistatic radar; ISAR; Micro-Doppler; Hough transform; Rotating parts

### 1 引言

双基地逆合成孔径雷达(Bi-ISAR)因其具有良好的“四抗性能”, 以及对目标成像时不受目标运动方向限制等特点使之成为雷达成像领域的一个重要研究方向<sup>[1-4]</sup>。而微多普勒效应(micro-Doppler effect)是指目标或目标结构中的微动部件使目标回波信号的多普勒频率发生展宽, 并会使目标像产生模糊现象<sup>[5-8]</sup>。实现目标微动信息的有效分离与提取, 除了可以得到清晰目标主体像外, 还能获得目标的精细运动特征, 并且进一步确定目标微动部件与目标主体之间的位置关系, 从而为目标的识别与分类提供更为丰富的信息。

近年来, 许多有效的微多普勒信息分离与提

取技术相继被提出, 如时频分析技术<sup>[9]</sup>、匹配追踪法<sup>[10]</sup>、经验模式分解(EMD)<sup>[11]</sup>、扩展 Hough 变换法<sup>[12]</sup>等。但这些方法都是针对单基雷达的, 其在收、发分置的双基地雷达系统中是否适用则还尚未研究。本文以自然界中最为常见的微动形式——旋转运动为例, 首先建立了含旋转部件运动目标的双基地 ISAR 系统数学模型, 并详细分析了目标结构部件旋转所产生的微多普勒效应。在分析研究了目标微多普勒在距离-慢时间谱图域的表现形式及其特点后, 针对双基地雷达收、发分置的特殊空间构成, 修正了基于扩展 Hough 变换的谱图域提取目标微动信息的方法, 最终获得双基地体制下雷达目标的真实微动信息和清晰主体像。

### 2 双基地雷达系统微多普勒信息分析

#### 2.1 双基地雷达微多普勒数学原理

在图 1 所示的双基地 ISAR 平面内, 含旋转部件的雷达目标以速度  $V$  沿水平方向运动。雷达坐标

2009-05-06 收到, 2010-06-15 改回

国家自然科学基金(60971100)资助课题

通信作者: 张群 zhangqunus@gmail.com

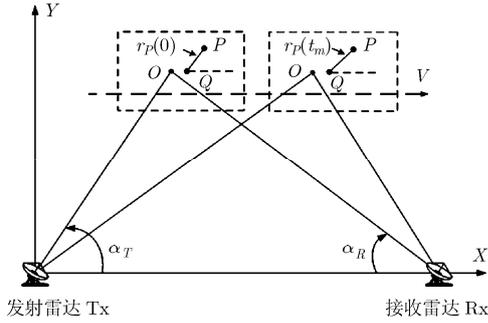


图1 运动目标双基地雷达系统

系 $(X, Y)$ 以发射雷达 $T_X$ 为原点, 基线为 $X$ 轴, 假设双基地雷达的基线长度为 $L$ , 则接收雷达 $R_X$ 的坐标为 $(L, 0)$ 。在目标模型中包含两类典型的散射点, 即(1)与双基地雷达之间只存在平动关系的目标主体散射点, 它包括目标中心 $O(x_O, y_O)$ 、旋转中心 $Q(x_Q, y_Q)$ 和其它非旋转点; (2)旋转点 $P$ , 其旋转半径、频率以及初相分别为 $r, \omega, \theta$ 。

由于目标主体散射点只存在平动, 所以在慢时间 $t_m$ 时刻, 主体散射点 $i$ 到发射雷达和接收雷达的距离 $R_{Ti}(t_m), R_{Ri}(t_m)$ 可分别表示为

$$R_{Ti}(t_m) = \sqrt{(x_i + Vt_m)^2 + y_i^2} \quad (1a)$$

$$R_{Ri}(t_m) = \sqrt{(L - (x_i + Vt_m))^2 + y_i^2} \\ = \sqrt{((L - x_i) - Vt_m)^2 + y_i^2} \quad (1b)$$

则 $t_m$ 时刻点 $i$ 的双基地雷达距离和 $R_i(t_m)$ 为

$$R_i(t_m) = \sqrt{(x_i + Vt_m)^2 + y_i^2} + \sqrt{((L - x_i) - Vt_m)^2 + y_i^2} \quad (2)$$

对 $R_i(t_m)$ 进行泰勒级数展开, 并舍去高阶项可得

$$R_i(t_m) \cong \sqrt{x_i^2 + y_i^2} + \sqrt{(L - x_i)^2 + y_i^2} \\ + \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} Vt_m + \frac{-(L - x_i)}{\sqrt{(L - x_i)^2 + y_i^2}} Vt_m \\ = R_i(0) + \left( \frac{x_i}{R_{Ti}(0)} - \frac{(L - x_i)}{R_{Ri}(0)} \right) \cdot Vt_m \quad (3)$$

其中 $R_{Ti}(0), R_{Ri}(0)$ 分别表示点 $i$ 到发射雷达和接收雷达的初始距离,  $i$ 点的初始双基地雷达距离和 $R_i(0) = R_{Ti}(0) + R_{Ri}(0)$ , 并令 $L_i = \frac{x_i}{R_{Ti}(0)} - \frac{(L - x_i)}{R_{Ri}(0)}$ 。

则旋转中心 $Q$ 的距离表达式为

$$R_Q(t_m) = R_Q(0) + L_Q \cdot Vt_m \quad (4)$$

在双基地雷达系统中, 目标尺寸远小于目标中心到收、发雷达之间的距离, 而且旋转点的距离变化量(旋转半径)是微小的变化量。因此, 旋转点 $P$ 到收、发雷达之间的距离 $R_{RP}(t_m), R_{TP}(t_m)$ 可以分别近似为其在 $R_XQ(t_m), T_XQ(t_m)$ 上的投影 $R_{TM}(t_m)$ 和

$R_{TN}(t_m)$ , 其中 $R_XQ(t_m), T_XQ(t_m)$ 分别表示为 $t_m$ 时刻旋转中心 $Q$ 与收、发雷达之间的连线。

如图2所示, 旋转点 $P$ 以 $Q$ 中心作周期性的旋转, 并假设在 $t_m$ 时刻, 旋转点 $P$ 到旋转中心 $Q$ 的距离矢量为 $r_P(t_m)$ , 则其在目标本地坐标系 $(x, y)$ 中的坐标为

$$r_P(t_m) = (r \cos(\omega t_m + \theta), r \sin(\omega t_m + \theta)) \quad (5)$$

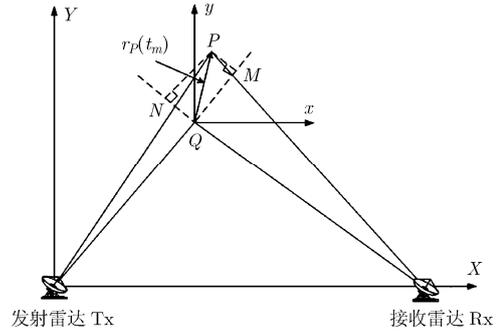


图2 旋转点距离计算示意图

通过投影近似, 点 $P$ 到发射、接收雷达距离可写为

$$\left. \begin{aligned} R_{TP}(t_m) &\cong R_{TM}(t_m) = R_{TQ}(t_m) + QM \\ R_{RP}(t_m) &\cong R_{RN}(t_m) = R_{RQ}(t_m) + QN \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 $QM, QN$ 分别为矢量 $r_P(t_m)$ 在 $T_XQ(t_m), R_XQ(t_m)$ 上的投影距离, 且有

$$\left. \begin{aligned} \angle PQM &= \omega t_m + \theta - \angle QT_XR_X \\ \angle PQN &= \pi - (\omega t_m + \theta + \angle QR_XT_X) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由于目标尺寸较小, 所以目标上任意散射点的发射、接收角都可以用目标中心 $O$ 的发射、接收角( $\angle OT_XR_X, \angle OR_XT_X$ )来近似。在双基地 ISAR 成像累积时间内(一般大约为3~5 s), 目标的运动会导致角( $\angle OT_XR_X, \angle OR_XT_X$ )发生变化(一般在度数左右), 但相对目标部件旋转所引起 $\angle PQM, \angle PQN$ 的变化, 其时变性基本可以忽略。因此, 可以将角( $\angle OT_XR_X, \angle OR_XT_X$ )视为常数, 并令其分别等于 $\alpha_T, \alpha_R$ 。则式(7)可近似写为

$$\left. \begin{aligned} \angle PQM &= \omega t_m + \theta - \alpha_T \\ \angle PQN &= \pi - (\omega t_m + \theta + \alpha_R) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 并整理后可得到旋转点 $P$ 的双基地距离和 $R_P(t_m)$ 为

$$R_P(t_m) = R_{TQ}(t_m) + R_{RQ}(t_m) + r(\cos(\omega t_m \\ + \theta - \alpha_T) - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_R)) \\ = R_Q(t_m) + r(\cos(\omega t_m + \theta - \alpha_T) \\ - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_R)) \quad (9)$$

将旋转中心 $Q$ 的双基地雷达距离和 $R_Q(t_m)$ 代入式

(9), 则有

$$R_P(t_m) = R_Q(0) + L_Q \cdot Vt_m + r(\cos(\omega t_m + \theta - \alpha_T) - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_R)) \quad (10)$$

## 2.2 含旋转部件目标的双基地 ISAR 回波信号分析

假设双基地 ISAR 系统发射线性调频信号, 则目标上任一散射点  $i$  的回波信号可写为

$$s_i(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - R_i(t_m)/c}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi(f_c(t - R_i(t_m)/c) + (1/2)\mu(t - R_i(t_m)/c)^2)) \quad (11)$$

其中  $f_c, T_p, \mu$  分别为雷达信号的中心频率、脉冲宽度和调频率,  $\text{rect}(\bullet)$  为矩形窗函数。若以目标中心  $O$  为参考点, 则由式(3)可得  $t_m$  时刻参考点的瞬时距离  $R_{\text{ref}}(t_m)$  为

$$R_{\text{ref}}(t_m) = R_O(t_m) = R_O(0) + L_O \cdot Vt_m \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)可得参考点的回波信号为

$$s_{\text{ref}}(t, t_m) = s_O(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - R_{\text{ref}}(t_m)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp(j2\pi(f_c(t - R_{\text{ref}}(t_m)/c) + (1/2)\mu(t - R_{\text{ref}}(t_m)/c)^2)) \quad (13)$$

其中  $T_{\text{ref}}$  为参考信号的脉冲持续时间, 一般地, 它略大于雷达信号脉冲宽度  $T_p$ , 对目标回波信号进行拉伸处理后, 可得

$$s_{ci}(t, t_m) = s_i(t, t_m) \cdot s_{\text{ref}}^*(t, t_m) = \text{rect}\left(\frac{t - R_i(t_m)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi\mu}{c}\left(t - \frac{R_{\text{ref}}(t_m)}{c}\right) - j\frac{2\pi}{\lambda_c}\Delta R_i(t_m) + j\frac{\pi\mu}{c^2}\Delta R_i^2(t_m)\right] \quad (14)$$

其中  $\Delta R_i(t_m)$  表示在  $t_m$  时刻, 目标散射点和参考点的双基地雷达距离和之间的差值。其中

$$\begin{aligned} \Delta R_Q(t_m) &= R_Q(t_m) - R_O(t_m) \\ &= \Delta R_Q(0) + (L_Q - L_O) \cdot Vt_m \end{aligned} \quad (15a)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_P(t_m) &= R_P(t_m) - R_O(t_m) \\ &= \{R_Q(t_m) + r[\cos(\omega t_m + \theta - \alpha_A) - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_B)]\} - R_O(t_m) \\ &= \Delta R_Q(t_m) + r[\cos(\omega t_m + \theta - \alpha_A) - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_B)] \end{aligned} \quad (15b)$$

式(14)中的相位项分为 3 部分, 第 1 项为距离项, 该项变换后可获得目标散射点的距离分布信息; 第 2 项是多普勒项, 它包含目标运动产生的多普勒频率信息; 第 3 项为剩余视频相位, 它会使多普勒有轻微改变<sup>[13]</sup>。对式(14)中相位项的第 2 项分别求

关于慢时间  $t_m$  的导数, 可得旋转中心  $Q$  和旋转点  $P$  产生的多普勒频移分别为

$$\left. \begin{aligned} f_{Q\text{-doppler}} &= (L_Q - L_O)V \\ f_{P\text{-doppler}} &= (L_Q - L_O)V - \omega r \cdot F \sin(\omega t_m + \theta + \varphi) \\ &= f_{Q\text{-doppler}} + f_{P\text{-micro-doppler}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

其中  $f_{P\text{-micro-doppler}} = -\omega \cdot r \cdot F \sin(\omega t_m + \theta + \varphi)$  为旋转点  $P$  产生的微多普勒频率。

从式(16)中可以看出: 旋转中心点产生  $Q$  的多普勒频率是与慢时间  $t_m$  无关的常数, 它只与目标的平动有关, 该结论对目标所有主体散射点成立; 旋转散射点产生的多普勒频率由随目标主体平动产生的多普勒频率和自身旋转所产生的微多普勒频率项构成。

对目标回波信号  $S_{ci}(t, t_m)$  求关于快时间  $t$  的傅里叶变换可得

$$S_{ci}(f, t_m) = T_p \text{sinc}\left(T_p \left(f + \frac{\mu}{c} \Delta R_i(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda_c} \Delta R_i(t_m) + j\frac{\pi\mu}{c^2} \Delta R_i^2(t_m) - j\frac{2\pi f}{c} \Delta R_i(t_m)\right] \quad (17)$$

从式(17)可以看出, 经过快时间变换后的回波信号在任一  $t_m$  时刻都是一系列波形为 sinc 函数的尖脉冲。尖脉冲在频率轴上的峰值出现的频率为  $f_i = -\Delta R_i(t_m) \cdot \mu / c$ , 它与  $\Delta R_i(t_m)$  成一一对应的关系, 通过对其乘以因子  $-c/\mu$ , 就可以分别得到目标散射点与参考点双基地雷达距离和之间差值  $\Delta R_i(t_m)$ , 也就可以得到各散射点的分布信息。则旋转中心  $Q$  和旋转点  $P$  在频率轴上的峰值位置所对应的频率为

$$\left. \begin{aligned} f_Q &= -\frac{\mu}{c} \Delta R_Q(t_m) \\ &= -\frac{\mu}{c} \Delta R_Q(0) - \frac{\mu}{c} (L_Q - L_O) Vt_m \\ f_P &= -\frac{\mu}{c} \Delta R_P(t_m) \\ &= -\frac{\mu}{c} \{\Delta R_Q(t_m) + r[\cos(\omega t_m + \theta - \alpha_A) - \cos(\omega t_m + \theta + \alpha_B)]\} \\ &= f_Q - \frac{\mu}{c} r \cdot F \cos(\omega t_m + \theta + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

将  $F = \sqrt{(\sin \alpha_T + \sin \alpha_R)^2 + (\cos \alpha_T - \cos \alpha_R)^2}$  称为双基地空间影响因子,

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sin \alpha_T + \sin \alpha_R}{\cos \alpha_T - \cos \alpha_R}\right)$$

为附加相位项。在式(18)中,  $(L_Q - L_O) \cdot Vt_m$  与  $\Delta R_Q(t_m)$  相比, 其值基本可以忽略。例如, 在仿真

实验的第 3 种参数配置下, 当  $\Delta R_Q(t_m) = 4.22$  m 时, 由  $(L_Q - L_O) \cdot V t_m$  在两次回波信号中产生的距离差仅仅为 0.03 mm, 所以忽略这一项是可行的。因此可以有  $\Delta R_Q(t_m) \cong \Delta R_Q(0)$ , 将其代入式(18)后, 可得

$$\left. \begin{aligned} f_Q &\cong -\frac{\mu}{c} \Delta R_Q(0) \\ f_P &\cong -\frac{\mu}{c} \Delta R_Q(0) - \frac{\mu}{c} r F \cos(\omega t_m + \theta - \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

从式(19)可以看出: 旋转中心点在频率轴上出现的位置是固定的, 它与慢时间  $t_m$  无关, 其它目标主体散射点也同样如此; 旋转散射点在频率轴上的位置会随慢时间作周期性变化。因此, 作为频率(或距离)-慢时间的 2 维函数, 含旋转部件目标的双基地 ISAR 回波谱图, 将由目标主体散射点产生的直线谱和旋转点产生的正弦曲线谱组成, 且旋转点对回波信号调制产生的正弦曲线谱变化周期与其旋转周期相同。式(19)同时说明, 旋转点在谱图上产生的正弦曲线还受到了目标与空间几何位置的调制, 具体表现在双基地空间关系影响因子和附加相位项的影响, 这一点与单基雷达体制下的微多普勒效应有本质区别。

### 3 改进的扩展 Hough 变换算法

扩展 Hough 是谱图域微多普勒信息提取的较为有效的方法之一<sup>[12]</sup>。根据扩展 Hough 变换理论, 可以使用 4 参数公式将谱图上的正弦曲线描述为

$$f = d \cdot \sin(\omega t_m + \varphi_0) + l \quad (20)$$

其中  $d$  为最大幅度,  $\omega$  是角频率,  $\omega = 2\pi/T_r$ ,  $T_r$  是正弦曲线的周期,  $\varphi_0$  代表初始相位,  $l$  描述了正弦曲线在频率(距离)轴的位置。通过从谱图域中提取的曲线参数信息, 经过换算就可以得到目标的微动信息, 并进一步实现目标微动信息的分离。

在双基地 ISAR 系统中, 由于双基地空间位置对目标曲线谱产生的影响。使得利用扩展 Hough 变换无法直接获得目标的真实旋转半径和相位信息。由于旋转相位包含了旋转部件出现的位置信息, 不能精确估计旋转部件位置也就无法对目标特殊部件(如舰艇上旋转的雷达天线等)进行的有效干扰或精确打击; 而不真实的旋转半径信息也会造成对目标的误判。因此, 为了得到真实的旋转信息必须消除双基地空间因子  $F$  和附加相位项  $\varphi$  的影响, 也就必须对扩展 Hough 方法进行修正和改进。图 3 给出了在双基地 ISAR 系统中, 利用修正的扩展 Hough 方法提取和分离目标微动信息的流程示意图, 其中虚线方框内表示修正步骤。

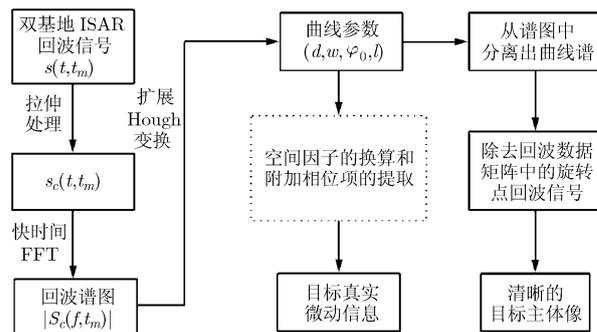


图 3 双基地 ISAR 微动信息分离与提取流程示意图

### 4 仿真分析

如图 4 所示, 设定 4 组双基地雷达配置参数对比分析双基地 ISAR 系统中微多普勒的特点, 对应的基线长度为别为 (0, 5, 10, 15) km。当基线长度为

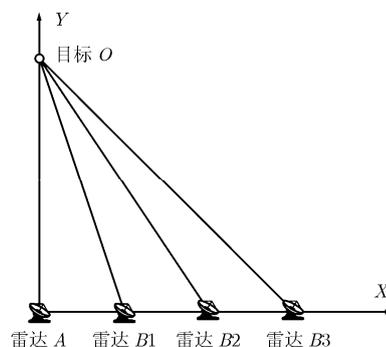


图 4 双基地雷达系统模型图

0 km 时, 收、发雷达处于同一位置, 系统退化为单基体制雷达。假设雷达发射带宽为  $B = 300$  MHz 线性调频信号, 其脉冲重复频率  $PRF = 1000$  Hz, 载频  $f_c = 10$  GHz, 对应的波长  $\lambda_c = 0.03$  m。假设目标以速度  $V = 300$  m/s 沿基线平行方向运动, 目标中心与发射雷达初始距离为 10 km。

假设目标由 5 个非旋转点和 2 个旋转点组成, 如图 5 所示。其中: 两个旋转点在目标坐标系中的初始坐标分别为 (3 m, 3 m) 和 (0 m, 3 m), 且各自以半径 (4 m, 8 m) 和频率 (4 Hz, 12 Hz) 绕旋转中心旋转, 其起始相位均为 0。则图 6 给出了 4 种参数下的双

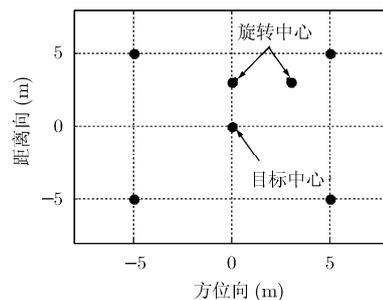


图 5 目标散射点模型

基地 ISAR 信号距离-慢时间 2 维谱图, 从图中可以看出: (1)含旋转部件目标的双基地 ISAR 2 维谱图由非旋转点产生的直线谱和旋转点产生的正弦曲线谱构成; (2)目标结构部件旋转所产生的正弦曲线谱的幅度受到目标的双基地空间位置的调制, 使其具有鲜明的双基地特征。

表 1 给出了 4 种雷达系统配置参数下基线长度、双基地空间因子、附加相位以及利用扩展 Hough 方法和修正的扩展 Hough 方法所提取的目标旋转部件信息(半径和起始相位)。从表 1 可以看出: 利用扩展 Hough 变换提取曲线谱参数所直接得到目标旋转点半径与其真实半径差异较大; 而经过双基地空间因子换算步骤处理, 即利用修正的扩展 Hough 变换所得到的旋转半径与目标旋转点真实半径基本一致。另外, 通过表 1 中所给出的附加相位项, 还能得到目标旋转部件真实位置信息。

图 7 给出了第 3 种参数配置下, 微多普勒信息

分离前后含旋转部件的双基地 ISAR 目标像。从图 7 可以看出: 未分离微多普勒信息的目标双基地 ISAR 像出现模糊现象, 在分离目标旋转部件产生的微多普勒信息后, 将得到清晰的目标主体像。

### 5 结论

本文以含旋转部件目标为例, 分析研究了双基地 ISAR 系统中目标结构部件微动所产生微多普勒信息的特点及其提取方法。研究表明: 在双基地 ISAR 系统中, 旋转形式的微动所产生的微多普勒频率服从正弦规律调制, 但微多普勒频率变化振幅受目标与双基地雷达空间位置即双基地空间因子调制, 使其具有鲜明的双基地特性。利用修正后的扩展 Hough 变换技术可以从双基地 ISAR 谱图中有效地提取目标的真实微动信息, 并进一步得到分离目标微动信息后的清晰主体像, 从而为基于双基地雷达目标的识别提供新的途径和方法。

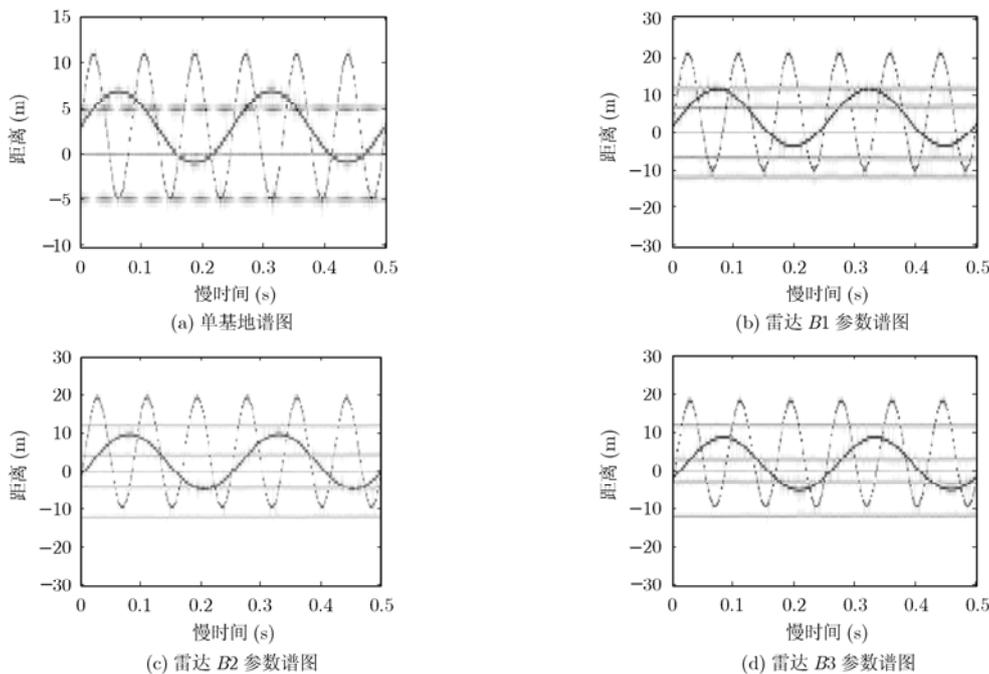


图 6 含旋转部件目标双基地 ISAR 距离-慢时间谱图

表 1 4 种雷达系统微动特征表

	基线长度(km)	双基地空间因子 $F$	起始相位( $^{\circ}$ )		旋转半径(m)	
			计算值	提取值	原算法	修正算法
单基地雷达	0		0	0	8	8
双基地雷达	A 和 B1	1.92	16	15	15.5	8.07
	A 和 B2	1.80	26	27	14.4	8.01
	A 和 B3	1.72	31	33	13.6	7.91

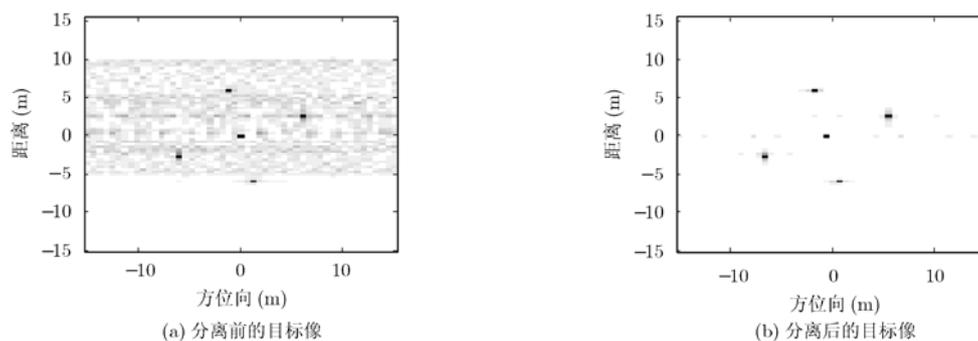


图7 微多普勒信息分离前后的含旋转部件目标双基地 ISAR 像

### 参考文献

- [1] Martorella M, Palmer J, and Litteton B. On bistatic inverse synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1125-1143.
- [2] 高昭昭, 梁毅, 邢孟道等. 双基地逆合成孔径雷达成像分析[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(5): 1055-1059.  
Gao Zhao-zhao, Liang Yi, and Xing Meng-dao, et al. Analysis of ISAR imagery for bistatic radar [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(5): 1055-1059.
- [3] 张亚标, 朱振波, 汤子跃, 等. 双站逆合成孔径雷达成像理论研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(6): 969-972.  
Zhang Ya-biao, Zhu Zhen-bo, and Tang Zi-yue, et al. Bistatic inverse synthetic aperture radar image formation [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(6): 969-972.
- [4] 黄艺毅, 王军锋, 刘兴钊. 双站ISAR成像算法的研究[J]. *信号处理*, 2007, 23(4A): 514-517.  
Huang Yi-yi, Wang Jun-feng, Liu Xing-zhao. Research on bistatic ISAR imaging algorithm [J]. *Signal Processing*, 2007, 23(4A): 514-517.
- [5] Chen V C, Li F Y, and Ho S-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.
- [6] Thayparan T, Lampropoulos G, and Wong S K. Distortion in the inverse synthetic aperture radar images of a target with time-varying perturbed motion [J]. *IEEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 221-227.
- [7] 陈行勇, 刘永祥, 姜卫东, 等. 微动目标合成距离像数学分析[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 585-589.  
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, and Jiang Wei-dong, et al. Mathematics of synthesizing range profile of target with micro-motion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 585-589.
- [8] 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, and Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-525.
- [9] Chen V C, Li F, and Ho S S, et al. Analysis of micro-Doppler signatures. *IEE Proceedings - Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(4): 271-276.
- [10] Mallat S and Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [11] Bai Xue-ru, Xing Meng-dao, and Zhou Feng, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [12] Zhang Qun, Yeo Tat-soon, and Tan Hwee-siang, 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.
- [13] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 26-28.

朱仁飞: 男, 1986年生, 硕士生, 研究方向为雷达成像及目标识别.

张群: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理与电子对抗.

罗迎: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为雷达成像与目标识别.

朱小鹏: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为 SAR/ISAR、目标识别.