

用慢时间域积分法实现雷达目标微多普勒信息的提取

罗迎^① 池龙^① 张群^{①②} 郭英^①

^①(空军工程大学电讯工程学院 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: 在 ISAR 成像中, 某些雷达目标的部件存在旋转运动, 会对回波信息引入微多普勒, 从而导致成像质量下降, 严重时甚至无法实现成像。该文提出一种基于对慢时间积分的简易方法, 成功实现了微多普勒信息与目标主体信息的分离, 获得了较为清晰的目标主体像; 通过对微多普勒信息的分析, 同时也能获得旋转部件的一些运动信息, 如旋转半径、旋转频率等。仿真结果证明了该方法的有效性, 并简单验证了不同信噪比条件下其微多普勒谱的提取性能。

关键词: ISAR 成像; 微多普勒; 旋转部件; 慢时间域积分

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2055-05

Extraction of Micro-Doppler Information Based on Slow-time Integration

Luo Ying^① Chi Long^① Zhang Qun^{①②} Guo Ying^①

^①(Inst. of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an 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 may be generated by additional frequency modulations on the returned radar signal, if the target contains rotating structures, such as a rotor on a helicopter. The body image will be contaminated due to the existence of the micro-Doppler. In the paper, a simple method based on integral of slow-time is introduced, which has separated the signal from the body of target and that from the rotating parts successfully. It makes the ISAR image clearer, and also provides some information of the rotating parts, such as the radius and the rotation frequency. Finally, a computer simulation is given to prove the effectiveness of the method, and the performances of extraction of micro-Doppler spectrogram in the condition of different SNR are also discussed.

Key words: ISAR image; Micro-Doppler; Rotating parts; Slow-time integration

1 引言

在 ISAR 成像中, 运动目标相对于雷达的运动被分解为平动分量和转动分量, 平动分量使得目标上各散射点的子回波具有相同的多普勒频移, 对成像没有贡献; 转动分量使得各散射点子回波有着不同的包络时延和相位变化, 据此可以实现对目标的成像。通常的做法是对目标做平动补偿, 使其转化为转台目标, 再利用各子回波多普勒的变化成像^[1]。但是如果当目标结构中包含旋转部件时, 对目标主体做平动补偿后并不能将该旋转部件转化为转台目标, 成像将受到污染。这种由于旋转部件运动对雷达回波信号产生的附加频率调制, 被称作“微多普勒”现象^[2-6]。微多普勒现象的存在, 一方面使得目标的 ISAR 成像质量下降, 特别是当目标结构

中包含大旋翼(如直升机的水平旋翼)或高反射系数的旋转和振动部件(如机载、舰载旋转雷达)时, 微多普勒现象对目标主体像的污染尤为严重; 另一方面, 微多普勒信息中也包含了旋转部件的若干特征, 能够利用其实现对特殊目标的识别。因此, 将微多普勒信息从目标主体信息中分离出来显得很有必要。

自从 2000 年 Chen 提出微多普勒的概念以来^[2], 有关微多普勒信息提取和分离的技术吸引了很多的研究人员^[3]。其中, 时频分析技术是使用最为广泛的技术^[4-7]。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的时频分析方法在微多普勒信息提取中的应用^[4,5]。当目标结构部件的微动为周期性的振动和旋转运动时, 其激励的微多普勒频率近似为正弦调制^[4,8,9], 利用这种先验信息, Setlur 等人通过设计正弦指数基函数来分离正弦振动激励的微多普勒信号^[10], 但由于该基函数只包含旋转频率和初始相位两个参数, 因而丢失了旋转

2007-01-29 收到, 2008-04-17 改回

国家自然科学基金(60672032)和陕西省自然科学基金(2006F40, 2007F28)资助课题

部件的旋转半径信息。文献[8]提出了一种基于扩展 Hough 变换提取微多普勒信息的方法, 文献[9]则利用了 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, 但都存在计算量过大的问题, 无法实现实时处理。本文试图寻求一种更为简单、易于实现的方法来分离目标微多普勒信息, 特别是如前所述的大旋翼目标的微多普勒信息, 改善主体成像质量, 并获得目标的一些微动信息。

2 目标谱图

假设目标和雷达处于一个 2-D 平面上, 如图 1 所示, 雷达位于坐标原点 O 固定不动, 目标中心的初始位置位于 y 轴上的 $O'(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$ 点, 并以速度 v 沿 x 轴方向运动。目标中心到雷达的距离为 R_{ref} 。目标由初始时刻分别位于坐标 (x_m, y_m) 的 m 个非旋转散射点 P_m 和初始时刻分别位于坐标 (x_n, y_n) 的 n 个旋转散射点 P_n 构成, 每个旋转散射点以不同的旋转半径 r_n 、旋转频率 ω_n 和初始相位 θ_{nl0} 绕 C 点旋转, C 点的初始时刻坐标为 (x_C, y_C) 。雷达发射信号 $p(t)$ 为线性调频信号, 即

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

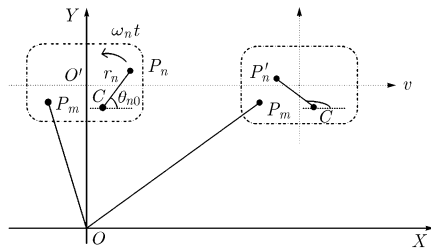


图1 运动目标示意图

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, μ 是调频率。则在慢时间 τ 时刻目标回波信号可写成

$$s(t, \tau) = \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{mk}(\tau)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_{mk}(\tau)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_{mk}(\tau)}{c}\right)^2\right]\right\} + \sum_{l=1}^n \sigma_{nl} \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{nl}(\tau)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_{nl}(\tau)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_{nl}(\tau)}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

其中 σ_{mk} , σ_{nl} 分别为第 k 个非旋转散射点和第 l 个旋转散射点的反射系数, $R_{mk}(\tau)$, $R_{nl}(\tau)$ 分别是第 k 个非旋转散射点和第 l 个旋转散射点在慢时间 τ 距雷达的距离, c 为光速。按照泰勒级数展开距离 $R_{mk}(\tau)$ 并忽略高阶项, $R_{mk}(\tau)$ 可被重新表示为^[11]

$$R_{mk}(\tau) = \sqrt{(x_{mk} + v\tau)^2 + y_{mk}^2} \approx R_{mk}(0) + x_{mk} \frac{v\tau}{R_{mk}(0)} \quad (3)$$

其中 $R_{mk}(0)$ 表示初始时刻第 k 个非旋转散射点 P_{mk} 距雷达的距离。同样可以得到旋转散射点 P_n 距雷达的距离为^[12]

$$R_{nl}(\tau) \approx R_C(0) + x_C \frac{v\tau}{R_C(0)} + r_{nl} \sin(\omega_{nl}\tau + \theta_{nl0}) \quad (4)$$

其中 $R_C(0)$ 为初始时刻 C 点到雷达距离, θ_{nl0} 是第 l 个旋转散射点的初始相位。

假设目标中心为参考点, 则参考信号为

$$s_r(t, \tau) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{\text{ref}}(\tau)/c}{T_{\text{ref}}}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(t - \frac{2R_{\text{ref}}(\tau)}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (5)$$

其中 T_{ref} 是参考信号的持续时间, 它比 T_p 略大一些。将式(2)与式(5)共轭相乘(即进行拉伸处理), 再以参考点的时间为基准(即用 t' 代换 $(t - 2R_{\text{ref}}(\tau)/c)$), 进行关于快时间 t' 的傅里叶变换, 并去除 RVP 项和包络“斜置”项的影响后得到

$$S_c(f, \tau) = \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} T_p \text{sinc}\left(T_p\left[f + \frac{2\mu}{c}\Delta R_{mk}(\tau)\right]\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_{mk}(\tau)\right] + \sum_{l=1}^n \sigma_{nl} T_p \cdot \text{sinc}\left(T_p\left[f + \frac{2\mu}{c}\Delta R_{nl}(\tau)\right]\right) \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R_{nl}(\tau)\right] \quad (6)$$

其中

$$\Delta R_{mk}(\tau) = R_{mk}(\tau) - R_{\text{ref}}(\tau) = \Delta R_{mk}(0) + \left(x_{mk} \frac{v\tau}{R_{mk}(0)} - x_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)}\right) \quad (7)$$

$$\Delta R_{nl}(\tau) = R_{nl}(\tau) - R_{\text{ref}}(\tau) \approx R_C(0) - R_{\text{ref}}(0) + \left(x_C \frac{v\tau}{R_C(0)} - x_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)}\right) + r_{nl} \sin(\omega_{nl}\tau + \theta_{nl0}) \quad (8)$$

由此可以看出, 距离像的峰值出现在

$$f_{mk} = -\frac{2\mu}{c}\Delta R_{mk}(\tau) = -\frac{2\mu}{c}\left(\Delta R_{mk}(0) + \left(x_{mk} \frac{v\tau}{R_{mk}(0)} - x_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)}\right)\right) \quad (9)$$

$$f_{nl} = -\frac{2\mu}{c}\Delta R_{nl}(\tau) = -\frac{2\mu}{c}\left(R_C(0) - R_{\text{ref}}(0) + \left(x_C \frac{v\tau}{R_C(0)} - x_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)}\right) + r_{nl} \sin(\omega_{nl}\tau + \theta_{nl0})\right) \quad (10)$$

其中式(9)和式(10)分别对应于非旋转散射点和旋转散射点。

将式(9)括号中的第2项单独写出

$$x_{mk} \frac{v\tau}{R_{mk}(0)} - x_{\text{ref}} \frac{v\tau}{R_{\text{ref}}(0)} \quad (11)$$

不难看出, 与第1项 $\Delta R_{mk}(0)$ 相比, 该项是非常小的。例如, 假设脉冲重复间隔 $\text{PRI} = 1/1000\text{s}$, $R_{\text{ref}}(0) = 10\text{km}$, $R_{mk}(0) = 10.05\text{km}$, $v = 300\text{m/s}$, $x_{mk} = 50\text{m}$, $x_{\text{ref}} = 0\text{m}$, 由 $x_{mk}v\tau/R_{mk}(0)$ 引入的在两次回波信号之间的距离差仅为 1.5mm , 而 $\Delta R_m(0) = 50\text{m}$ 。故在式(9)中这项可以被忽略,

即有

$$\Delta R_{mk}(\tau) \approx \Delta R_{mk}(0), f_{mk} = -\frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(0) \quad (12)$$

这意味着非旋转散射点在频率轴的位置与慢时间无关。同理,经过近似,式(10)也可以写为

$$f_{nl} = -\frac{2\mu}{c} (R_C(0) - R_{\text{ref}}(0) + r_{nl} \sin(\omega_{nl}\tau + \theta_{nl0})) \quad (13)$$

这意味着旋转散射点在频率轴的位置随慢时间作正弦形式的变化。也就是说,非旋转散射点与参考点之间的距离是固定的,而旋转散射点与参考点之间的距离是随慢时间变化的。从式(8)和式(13)不难发现旋转散射点与参考点之间的距离是关于慢时间的一个正弦函数。因此,作为频率(或距离)与慢时间的二维函数,目标谱图将由一些直线和正弦曲线构成。这使微多普勒信息提取和分离的问题转化为分离谱图中直线谱和正弦谱的问题。

3 慢时间域积分法

本节讨论通过对慢时间积分的方法来分离谱图中直线和正弦曲线,从而得到较为清晰的目标 ISAR 像,并获得旋转部件的旋转半径和旋转频率等信息。由于 $\mathbf{S}_c(f, \tau)$ 是关于 f 和 τ 的二元函数,为了以下叙述的方便,在对 τ 积分时,不妨令 $f = f_i$, f_i 为 f 取值范围内的某常数。

通过简单的推导,可以得到下面的等式:

$$\begin{aligned} & |a_1 e^{j\alpha_1} + a_2 e^{j\alpha_2} + \dots + a_n e^{j\alpha_n}|^2 \\ &= a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2 + 2 \sum_{i=1, j=1, i \neq j}^n a_i a_j \cos(\alpha_i - \alpha_j) \quad (14) \end{aligned}$$

其中 $a_i, \alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 均为实数。将 $\mathbf{S}_c(f_i, \tau)$ 的表达式(6)代入式(14),有

$$\begin{aligned} |\mathbf{S}_c(f_i, \tau)|^2 &= \sum_{k=1}^m \sigma_{mk}^2 T_p^2 \text{sinc}^2 \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \right) \\ &+ \sum_{l=1}^n \sigma_{nl}^2 T_p^2 \text{sinc}^2 \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nl}(\tau) \right) \right) \\ &+ 2 \sum_{k=1, l=1, k \neq l}^m \sigma_{mk} \sigma_{ml} T_p^2 \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \right) \\ &\cdot \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{ml}(\tau) \right) \right) \cos(\Delta\phi_1) \\ &+ 2 \sum_{k=1, l=1, k \neq l}^n \sigma_{nk} \sigma_{nl} T_p^2 \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nk}(\tau) \right) \right) \\ &\cdot \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nl}(\tau) \right) \right) \cos(\Delta\phi_2) \\ &+ 2 \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n \sigma_{mk} \sigma_{ml} T_p^2 \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \right) \\ &\cdot \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{nl}(\tau) \right) \right) \cos(\Delta\phi_3) \quad (15) \end{aligned}$$

其中 $\Delta\phi_1 = -(4\pi/\lambda)(\Delta R_{mk}(\tau) - \Delta R_{ml}(\tau))$, $\Delta\phi_2 = -(4\pi/\lambda)(\Delta R_{nk}(\tau) - \Delta R_{nl}(\tau))$, $\Delta\phi_3 = -(4\pi/\lambda)(\Delta R_{mk}(\tau) - \Delta R_{nl}(\tau))$ 。

观察式(15)右边的第2项、第4项和第5项可以发现,由于函数 $\text{sinc}(T_p(f_i + 2\mu\Delta R_{nl}(\tau)/c))$ 只有当慢时间取满足关系 $f_i = -2\mu\Delta R_{nl}(\tau)/c$ 的 τ 或者 τ 的一个小邻域内的值时

才能使其取到峰值,而取其余值时,该函数的值很小。这样,对 $|\mathbf{S}_c(f_i, \tau)|^2$ 中的第2项、第4项和第5项积分时,纵观整个慢时间域,其积分值是很小的。对其进行舍弃并结合式(12)和式(14),有

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau |\mathbf{S}_c(f_i, \tau)| d\tau &\approx \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left| \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} T_p \right. \\ &\cdot \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \right) \exp \left(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{mk}(\tau) \right) \left. \right| d\tau \\ &\approx \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left| \sum_{k=1}^m \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(0) \right) \right) \right. \\ &\cdot \exp \left(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{mk}(0) \right) \left. \right| d\tau \quad (16) \end{aligned}$$

当 f_i 等于常数 $-2\mu\Delta R_{mk}(0)/c$ 时,式(16)右边的积分表达式中第 k 个非旋转散射点的信号分量取峰值,其他非旋转散射点的信号分量相比之下可以忽略不计,于是有

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau |\mathbf{S}_c(f_i, \tau)| d\tau &\approx \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left| \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(0) \right) \right) \right| d\tau \\ &= \left| \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f_i + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(0) \right) \right) \right| \quad (17) \end{aligned}$$

刚好等于第 k 个非旋转散射点回波分量的模值,从而实现了第 k 个非旋转散射点的信号分量的提取(参见式(6)右边的第1项)。在 f 的取值范围内不断改变 f_i 的值对 τ 积分,就可以实现所有非旋转散射点的信号分量的提取。用原来的 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 减去这些分量,剩下的便是旋转散射点的信号分量,即

$$|I(f, \tau)| = |\mathbf{S}_c(f, \tau)| - \sum_{k=1}^m \left| \sigma_{mk} T_p \text{sinc} \left(T_p \left(f + \frac{2\mu}{c} \Delta R_{mk}(0) \right) \right) \right| \quad (18)$$

在数字信号处理中, $\mathbf{S}_c(f, \tau)$ 被表示为一个数据矩阵,不失一般性,设其横向量为慢时间域采样值,纵向为快时间频率域采样值。因此,对其在特定的 f_i 值时求 τ 的积分,转化为求矩阵 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 每一横向量的和。此外,为了获得干净的 ISAR 图像,可以在上述处理前对 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 设置阈值进行滤波,滤除背景噪声。通常,对于每次回波信号的频谱,在作归一化处理后那些低于 -20dB 的频谱分量可以认为是噪声而滤除。因此,该算法可以按照以下几步来具体实施:

步骤 1 保存矩阵 $\mathbf{S}_c(f, \tau)$ 里每个点的相位值到一个新的矩阵 $\mathbf{P}(f, \tau)$ 。因为后续的处理是针对 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 的,如果不保存其相位信息,将无法对 $\mathbf{S}_c(f, \tau)$ 作关于慢时间的傅立叶变换来获得 ISAR 像;

步骤 2 设置阈值对 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 进行滤波;

步骤 3 计算 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 每行的均值,再在 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 每行中减去该均值,得到旋转点的谱图 $|I(f, \tau)|$ 。同样地,可以设置阈值对其进行滤波;

步骤 4 用 $|\mathbf{S}_c(f, \tau)|$ 减去 $|I(f, \tau)|$, 得到非旋转点的谱图

$|I_1(f, \tau)|$;

步骤 5 用 $P(f, \tau)$ 和 $|I_1(f, \tau)|$ 恢复矩阵 $I_1(f, \tau)$, 对 $I_1(f, \tau)$ 做关于 τ 的傅里叶变换, 得到非旋转点的 ISAR 像。

获得旋转点的谱图 $|I(f, \tau)|$ 后, 可以通过简单的图像相关法得到正弦曲线的频率和振幅信息, 进而获得目标旋转部件的微小信息: 旋转频率对应正弦曲线的频率, 旋转半径可由下式计算:

$$r_{nl} = \frac{A cdf}{2\mu} \quad (19)$$

式中 A 为正弦信号的幅值, df 为频域采样间隔。

算法的框图如图 2 所示。由于算法在分离微多普勒信息时只涉及到简单的加减运算和乘法运算, 运算量很低。文献 [8] 中所提基于扩展 Hough 变换提取微多普勒信息的方法, 要在四维的 HT 参数空间搜索正弦曲线参数, 计算量大, 运算时间通常以小时计; 而文献 [9] 中的 chirplet 分解法, 则要将每个距离单元的回波信号分解为四参数的 chirplet 基的集合, 在此基础上再进行信号的重构, 运算量更为巨大。基于时频分析的微多普勒信息提取方法, 则存在交叉项的问题, 而且计算量也较本文所提算法大。

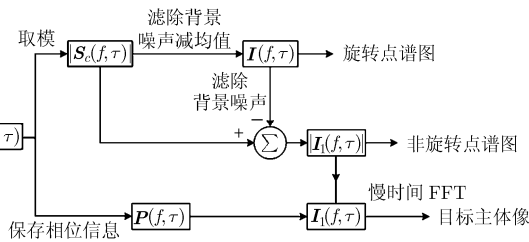


图 2 慢时间积分法流程图

4 仿真验证

4.1 有效性验证

首先假设目标点散射模型由 5 个非旋转散射点和 2 个旋转散射点构成, 2 个旋转散射点分别以 6.67Hz 和 12Hz 的旋转频率, 6m 和 3m 的旋转半径绕其中一个非旋转散射点旋转。雷达载频 10GHz, 带宽 300MHz, 发射信号为脉宽 $T_p = 1\mu s$ 的线性调频信号, 脉冲重复频率 $PRF=1000Hz$, 目标运动速度 $v=300m/s$, 成像积累时间 1s。径向距离分辨率 Δ_R 和横向分辨率 Δ_c 均为 0.5m。目标 ISAR 像如图 3(a) 所示, 由于旋转散射点的存在, 成像不够干净、清晰。为了便于对比, 不含旋转散射点情况下的目标 ISAR 像也给了出来, 如图 3(b) 所示。

处理前的目标谱图如图 3(c) 所示。步骤 3 后获得的旋转点谱图 $|I(f, \tau)|$ 如图 3(d) 所示, 可见, 正弦曲线谱已经被很好地分离了出来。对该图做简单的图像处理(如相关处理)可以得到正弦曲线的周期和振幅, 通过计算得到, 两个旋转散射点的频率分别为 6.67Hz 和 11.76Hz, 半径分别为 6.2130m 和 3.1065m, 比较接近真实值。

非旋转点的谱图 $|I_1(f, \tau)|$ 如图 3(e) 所示, 此时正弦曲线已经被消除。最后的成像结果如图 3(f) 所示, 与图 3(a) 相比, 图像质量有了明显的提高, 与图 3(b) 的质量比较接近。

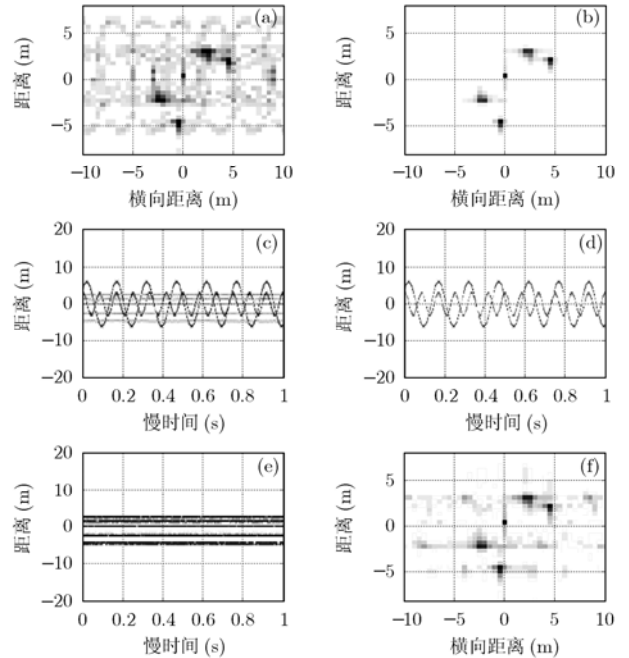


图 3 目标点散射模型仿真

4.2 微多普勒谱提取性能

下面考察该算法提取微多普勒谱的性能在不同信噪比条件下的表现。以图 3(a) 所示目标模型为例, 图 4 画出了 SNR 分别为 -10dB, -15dB 和 -17dB 时提取到的旋转点谱图。SNR = -10dB 时图中的正弦曲线依然较清晰, 直至 SNR = -17dB 时才变得难以辨认, 由此可见该算法有着良好的微多普勒谱提取性能。

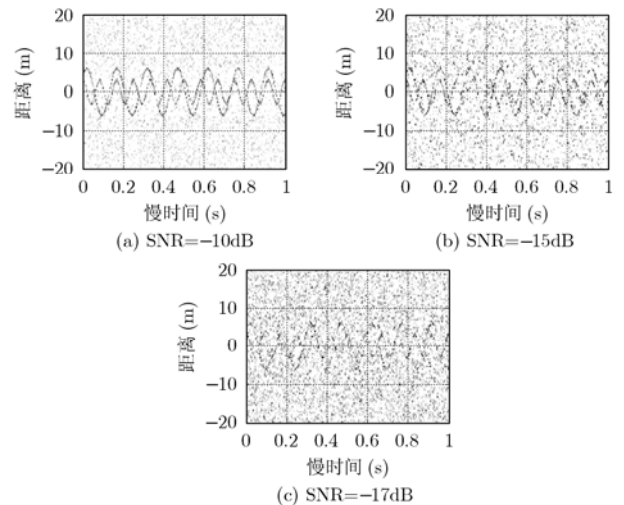


图 4 慢时间积分法在不同信噪比条件下的表现

5 结束语

本文提出了一种较为简单的微多普勒信息提取和分离方法。该方法利用对慢时间域积分的方法, 近似得到非旋转散射点谱分量, 从而分离出旋转散射点谱分量。这种方法运算简单, 实现方便, 并且能获得较高质量的 ISAR 像, 提取旋转部件的基本信息。文中详细说明了算法的实现步骤, 通过仿真试验验证了该方法的有效性, 并简单分析了不同信噪比条件下其微多普勒谱提取性能。

参 考 文 献

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2006: 230-231.
- [2] Chen V C. Analysis of radar micro-Doppler signature with time-frequency transform. Proc Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor, PA, USA, Aug. 14-16, 2000: 463-466.
- [3] 庄钊文, 刘永祥, 黎湘. 目标微动特性研究进展. 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. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 520-525.
- [4] Chen V C and Li F. Analysis of micro-Doppler signatures. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 271-276.
- [5] Chen V C and Li F. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(1): 2-21.
- [6] Thayaparan T, Abrol S, and Riseborough E. Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition. Technical Memorandum, DRDC Ottawa, TM 2004-170, September 2004.
- [7] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 等. 微多普勒分析和参数估计. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 360-363.
Chen Hang-yong, Liu Yong-xiang, Li Xiang, *et al.* Analysis of micro-Doppler and parameters estimation. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, 25(5): 360-363.
- [8] Zhang Q, Yeo T S, and Tan H S, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299.
- [9] Li J and Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts. *IEE Proc. Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(4): 284-291.
- [10] Setlur P, Amin M, and Thayaparan T. Micro-doppler signal estimation for vibrating and rotating targets. Proceedings of the Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications, Sydney, Australia, 2005: 639-642.
- [11] Zhang Q and Yeo T S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InISAR technique. *IEEE Trans. on GRS*, 2004, 42(9): 1818-1828.
- [12] She Z H, Gray D A, and Bogner R E. Autofocus for inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging. *Signal Processing*, 2001, 81(2): 275-291.

罗 迎: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像及目标识别.

池 龙: 男, 1958 年生, 副教授, 目前研究方向为通信对抗.

张 群: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达信号与信息处理、雷达成像等方面的研究工作.