

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

罗 迎¹, 张 群^{1,2}, 柏又青³, 朱 丰¹

(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;
3. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051)

摘 要: 研究了线性调频步进信号体制下雷达目标的微多普勒效应, 分析了距离像走动和卷绕现象, 并重点讨论了旋转和振动形式的微动引起的微多普勒效应, 推导出了其在距离-慢时间平面的解析表达式. 在此基础上, 提出利用推广的 Hough 变换法并结合时频分析来提取微多普勒特征的方法, 并详细论述了不同旋转(振动)频率和半径(振幅)情况下的处理算法. 仿真实验验证了文中微多普勒效应理论分析和特征提取方法的正确性.

关键词: 微多普勒; 线性调频步进信号; Hough 变换; 时频分析; 目标识别

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)12-2741-06

Analysis of Micro-Doppler Effect and Feature Extraction of Target in Frequency-Stepped Chirp Signal Radar

LUO Ying¹, ZHANG Qun^{1,2}, BAI Youqing³, ZHU Feng¹

(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; 3. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China)

Abstract: The theory of the micro-Doppler (nrD) effect in frequency-stepped chirp signal is studied, and the causations of the range profile's migration and wrapping are analyzed. The nrD effects induced by rotation and vibration are discussed in detail and the analytical expressions of the nrD signatures in the range-slow time plane are deduced. The algorithm for extraction of nrD signatures is proposed which is based on the Hough transform and time-frequency analysis. The implementations of the algorithm under condition of different rotating/vibrating frequencies and radii are discussed. Simulations are given to prove the validity of the theoretical analyses and the proposed nrD extraction method.

Key words: micro-Doppler; frequency-stepped chirp signal; Hough transform; time-frequency analysis; target recognition

1 引言

当前, 目标特征控制技术大大增加了目标探测与识别的技术难度. 随着高分辨雷达成像技术的逐渐成熟, 对目标微动特征的提取和识别成为了目标识别领域一个新的技术热点^[1]. 由目标微动引起的对雷达回波信号的附加频率调制现象称为微多普勒效应(micro-Doppler effect)^[2]. 微多普勒现象可被视为目标结构部件与目标主体之间相互作用的结果, 它是该雷达目标所具有的独特特征, 因而能使我们确定目标的一些性质, 完成对特殊目标的分类、识别、成像^[3].

自从 2000 年 Chen 将微多普勒的概念引入雷达成像领域以来^[4], 微多普勒效应在单频信号和线性调频信号体制雷达中已经得到了较为广泛的研究^[2-9]. 其中,

时频分析是使用最为广泛的技术^[4-7]. 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^[2-5], 利用这种先验信息, 文献[8]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[9]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.

微多普勒信息刻画了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. 线性调频步进信号可以在不增加系统瞬时带宽的情况下用数字信号处理的方法合成高分辨距离像, 并解决了步进频率信号数据率低下的问题, 是一种极具发展潜力的高分辨雷达信号^[10-12], 因此研究该信号体制雷达的微多普勒效应有着重要的意义.

本文针对线性调频步进信号的微多普勒效应进行

了较为深入的分析,并提出了基于推广的 Hough 变换和时频分析的微多普勒特征提取方法.由于线性调频步进信号距离像合成的特点,由旋转和振动形式的微动产生的微多普勒信息在距离-慢时间平面上不再满足简单的正弦关系,因此文献[9]所提方法在此并不适用.本文构造了新的 Hough 变换方程来实现线性调频步进信号中微多普勒信息的提取,并结合时频分析方法,根据不同的旋转(振动)频率和半径(振幅)分别采用了不同的处理算法.

2 微多普勒效应分析

2.1 线性调频步进信号成像原理

线性调频步进信号一簇脉冲串中的第 i 个子脉冲信号的表达式为

$$U_i(t) = u(t - iT_r) \cdot \exp\left\{j2\pi(f_0 + i\Delta f)(t - iT_r) + j\theta_i\right\}, \quad 0 \leq i \leq N-1 \quad (1)$$

其中 $u(t) = \text{rect}(t/T_1) \cdot \exp(j\pi\mu t^2)$, t 为快时间, μ 为调频斜率, T_1 为子脉冲宽度, T_r 为子脉冲重复周期, $f_0 + i\Delta f$ 和 θ_i 分别为第 i 个子脉冲的载频和初相, N 为步进频率数.对于点目标,第 i 个子脉冲的回波可写为

$$s(t, i) = \text{rect}\left\{\frac{t - iT_r - 2R/c}{T_1}\right\} \cdot \exp(j\pi\mu(t - iT_r - 2R/c)^2) \cdot \exp\left\{j2\pi(f_0 + i\Delta f)(t - iT_r - 2R/c) + j\theta_i\right\} \quad (2)$$

其中 R 为目标到雷达距离, c 为光速.回波信号与参考信号“dechirp”处理后,再以参考点的时间为基准作关于 t 的傅立叶变换并去除 RVP 项和包络斜置项,得到^[13]

$$S_c(\omega, i) = T_1 \text{sinc}\left[T_1\left(\omega + \frac{4\pi\mu}{c}R_\Delta\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f_0 + i\Delta f)R_\Delta\right] \quad (3)$$

其中 $R_\Delta = R - R_0$, R_0 为参考点到雷达距离. $|S_c(\omega, i)|$ 的峰值出现在 $\omega = -4\pi\mu R_\Delta/c$ 处,此即点目标的粗分辨一维距离像.为简化分析,考虑通常 ISAR 目标的雷达径向长度一般小于不模糊距离区间长度,对该距离单元的采样就包含了目标全部信息,故令 $\omega = -4\pi\mu R_\Delta/c$,再对各次粗分辨距离像作关于 i 的 FFT,得到

$$S(k) = C \cdot \text{sinc}\left[k + \frac{4\pi\Delta f}{c}R_\Delta\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_0}{c}R_\Delta\right] \quad (4)$$

其中 C 为常数. $|S(k)|$ 的峰值出现在 $k = -4\pi\Delta f \cdot R_\Delta/c$ 处,形成精分辨距离像.每一簇脉冲串都能得到目标的一幅精分辨距离像,发射多簇脉冲串后对每个精分辨距离单元作关于慢时间的 FFT 就能得到目标的 ISAR 像^[13].

2.2 微动特征分析

当目标结构部件存在微动时,其运动将引起脉冲串内各次子脉冲回波相位历程的变化,即微多普勒效应.如图 1 所示, P 为参考点,在标准的运动补偿后,其可以视为静止点, Q 为相对于 P 以速度 v 沿雷达视线方

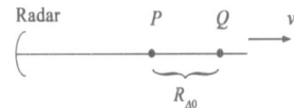


图1 目标微动示意图

向运动的微动点.由于 Q 的运动,在一个脉冲串内,式(3)中该点到参考点 P 的距离 R_Δ 应表示为 $R_{\Delta 0} + iT_r v$, $R_{\Delta 0}$ 为该次脉冲串时间内 P 与 Q 之间的初始距离.通常在一个脉冲串的时间内,微动点的位移不会超过一个粗分辨距离单元,因此式(3)可重新写为

$$S_c(\omega, i) = T_1 \text{sinc}\left[T_1\left(\omega + \frac{4\pi\mu}{c}R_{\Delta 0}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f_0 + i\Delta f)(R_{\Delta 0} + iT_r v)\right] \quad (5)$$

这样,精分辨像的峰值出现在

$$k = \phi(i) = -\frac{4\pi}{c}\Delta f \cdot R_{\Delta 0} - \frac{4\pi}{c}f_0 T_r v - \frac{8\pi}{c}\Delta f T_r v \quad (6)$$

$\phi(i)$ 为式(5)中右边表达式的相位.分析式(6)右边的三项可知:第一项为微动点的初始位置项;第二项为由微动引起的距离像走动,与微动点运动速度成正比;第三项的绝对值与前两项的绝对值相比很小,可以忽略不计,但由于速度 v 与 i 的耦合,这一项的存在使得对式(5)作 FFT 形成精分辨距离像时,微动点所对应的峰值将出现展宽.忽略第三项后,式(6)可写为

$$k = -\frac{4\pi}{c}\Delta f \cdot R_{\Delta 0} - \frac{4\pi}{c}f_0 T_r v \quad (7)$$

此即微动点在精分辨距离像里的峰值位置.该式两边同除以 $-4\pi\Delta f/c$ 即可以实现距离定标:

$$r = R_{\Delta 0} + \frac{f_0 T_r v}{\Delta f} \quad (8)$$

由于精分辨像是由粗分辨像作 N 点 DFT 得到,因此当 k 的取值超出 $[-\pi, \pi]$ 后,微动点的峰值将会发生卷绕现象.要使微动点的精分辨像不发生卷绕,必须满足条件

$$|k| < \pi \text{ 或 } -\frac{c}{4\Delta f} < r < \frac{c}{4\Delta f} \quad (9)$$

即微动点的精分辨距离像位于一个不模糊距离区间之内.结合式(8)可得 v 必须满足的条件

$$-\frac{1}{f_0 T_r} \left[\frac{c}{4} + \Delta f \cdot R_{\Delta 0} \right] < v < \frac{1}{f_0 T_r} \left[\frac{c}{4} - \Delta f \cdot R_{\Delta 0} \right] \quad (10)$$

当微动参数不满足式(9)和式(10)时,由于卷绕效应,微动点在精分辨像上的位置由下式决定:

$$r = \text{mod}\left[r + \frac{c}{4\Delta f}, \frac{c}{2\Delta f}\right] - \frac{c}{4\Delta f} \quad (11)$$

$\text{mod}(a, b)$ 为取余运算.

2.3 旋转和振动微多普勒特征

当微动点做旋转或振动形式的运动时,标准的运

动补偿后其在雷达视线方向上的位移表达式可写为

$$R(t_m) = R_Q + \rho \cos(\omega_0 t_m + \theta_0) \quad (12)$$

其中 R_Q 为旋转或振动中心到参考点的距离, ρ 为振幅, ω_0 为旋转或振动频率, θ_0 为初始相位, t_m 为慢时间(即各次脉冲串的发射时间). 其速度表达式可写为

$$v(t_m) = R'(t_m) = -\rho \omega_0 \sin(\omega_0 t_m + \theta_0) \quad (13)$$

将式(12)和式(13)代入式(7), 得到旋转或振动点在每次精分辨率上的峰值位置:

$$k(t_m) = -\frac{4\pi}{c} \Delta f \cdot R(t_m) - \frac{4\pi}{c} T_r v(t_m) = -\frac{4\pi \Delta f}{c} \cdot \left[R_Q + \rho \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}} \cos(\omega_0 t_m + \theta_0 + \phi) \right] \quad (14)$$

其中 $\phi = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}}}\right)$. 当 $k(t_m)$ 满足式(9)条件时, 式(14)除以 $-4\pi \Delta f / c$ 就得到精分辨率上微动点的真实位置坐标:

$$r(t_m) = R(t_m) + \frac{f_0 T_r v(t_m)}{\Delta f} = R_Q + \rho \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}} \cos(\omega_0 t_m + \theta_0 + \phi) \quad (15)$$

当 $k(t_m)$ 不满足式(9)条件时, 精分辨率发生卷绕, 由式(11)可得微动点在精分辨率上的位置:

$$\hat{r}(t_m) = \text{mod}\left(R_Q + \rho \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}} \cdot \cos(\omega_0 t_m + \theta_0 + \phi) + \frac{c}{4\Delta f}, \frac{c}{2\Delta f}\right) - \frac{c}{4\Delta f} \quad (16)$$

显然式(15)是式(16)在式(9)条件下的一种特殊情况. 因此, 式(16)完整描述了线性调频步进信号下旋转和振动形式微动的微多普勒特征. 由式(15)和式(16)可以得到以下三点结论:

(1) 当旋转(振动)点的微动满足式(9)条件时, 在距离-慢时间平面上, 其微多普勒特征表现为正弦形式曲线, 曲线的周期等于微动点的运动周期, 振幅为微动点在雷达视线方向上的半径(振幅)的 $\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}}$ 倍;

(2) 正弦曲线的峰值点并不意味着旋转(振动)点在此时刻运动到了其离雷达最近或最远的地方, 因为式(12)取极值时, 式(15)并不能取到极值, 中间有一个相移 ϕ ;

(3) 当旋转(振动)点的微动不满足式(9)条件时, 在距离-慢时间平面上, 旋转(振动)点的微多普勒特征表现为卷绕的正弦曲线, 该曲线的周期等于旋转(振动)点的运动周期.

以上三个性质体现了线性调频步进信号与线性调频信号下微多普勒特征的异同. 在线性调频步进信号雷达中, 距离-慢时间平面上的曲线尽管仍包含了旋转(振动)点的微动参数信息, 但曲线参数不再直接表征微动点的运动参数, 而是存在着换算关系. 引起这些区别的根本原因在于线性调频步进信号体制下由目标运动引起的距离走动和卷绕现象.

3 微多普勒特征提取

基于第2节的分析, 我们可以通过提取距离-慢时间平面上的曲线参数来获取目标的微动参数. Hough 变换是检测图像中直线和满足特定解析式的各类曲线的一种有效方法, 最早由 Paul Hough 提出并申请了专利^[14]. 用来检测各种曲线的 Hough 变换称为推广的 Hough 变换. 对于特定形式的微动, 其引起的微多普勒效应在距离-慢时间平面上有着特定的表现形式, 只需推导出其解析表达式, 就可以构造 Hough 变换方程, 进而提取其微动特征.

下面依然以旋转和振动形式的微动为例阐述微多普勒特征的提取方法. 将式(16)写成如下的等价形式

$$R_Q = \hat{r}(t_m) + M \cdot \frac{c}{2\Delta f} - \rho \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}} \cdot \cos(\omega_0 t_m + \theta_0 + \phi), M = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (17)$$

由目标径向长度小于不模糊距离区间长度的假设, 式(17)可以进一步写为

$$R_Q = \text{mod}(\hat{r}(t_m) - A \cos(2\pi \Omega_m + \zeta) + \frac{c}{4\Delta f}, \frac{c}{2\Delta f}) - \frac{c}{4\Delta f} \quad (18)$$

其中 $A = \rho \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}}$, $\Omega = \omega_0 / (2\pi)$, $\zeta = \theta_0 + \phi$. 式(18)即为 Hough 变换方程, 利用推广的 Hough 变换, 将 $(t_m, r(t_m))$ 平面的曲线检测问题转化为参数 (R_Q, A, Ω, ζ) 空间的峰值检测问题. 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 $\omega_0 = 2\pi \Omega$, 再用

$\sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 f_0^2 T_r^2}{\Delta f^2}}$ 算出振幅放大倍数, 将曲线参数 A 换算为旋转(振动)点在雷达视线方向上的半径(振幅), 再利用雷达发射波束的角度可计算出它们的真实半径(振幅).

该方法可以获取大部分含旋转(振动)部件目标的微动参数(如直升机水平旋翼的转动、指挥车辆上旋转天线的转动等), 但还要考虑到以下两种特殊情况.

(1) $A < c / (4V \Delta f)$ 的情况:

此时曲线的振幅小于半个距离精分辨率, 通常由引擎旋转引起的目标表面振动、人体呼吸引起的胸腔起伏等都属于这类情况. 在这种情况下, 式(16)所示的距离-慢时间平面上的曲线将呈现为一条水平直

线, Hough 变换无法直接应用. 考虑式 (5), 令 $\omega = -4\pi R_{\Delta 0}/c$, 忽略 v 与 i 的耦合项后, 对其作傅立叶变换并用 $R(t_m)$ 和 $v(t_m)$ 分别替换 $R_{\Delta 0}$ 和 v , 可得

$$S(k, t_m) = C' \operatorname{sinc} \left[k + \frac{4\pi \Delta f}{c} R(t_m) + \frac{4\pi}{c} \int_0^{t_m} T_p v(t) dt \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} R(t_m) \right] \quad (19)$$

其中 C' 为常数. 因为 $A < c/(4N\Delta f)$, $|S(k, t_m)|$ 在距离-慢时间平面上呈现为水平直线, 故峰值位置 $k = -4\pi \Delta f R(t_m)/c - 4\pi \int_0^{t_m} T_p v(t) dt/c \approx C''$, C'' 为常数. 令 $k = C''$, 对上式的相位关于慢时间 t_m 求导, 可得

$$l(t_m) = \frac{1}{2\pi} \dot{\phi}(t_m) = \frac{2}{c} f_0 \rho \omega_0 \sin(\omega_0 t_m + \theta_0) \quad (20)$$

可见 $S(k, t_m)|_{k=C''}$ 的瞬时频率是关于 t_m 的正弦函数. 因此, 要提取微动点的运动信息, 可以对 $S(k, t_m)|_{k=C''}$ 作时频分析, 再利用推广的 Hough 变换提取时频平面上的曲线参数. 同样, 当 $|l(t_m)| > BRF/2$ 时 (BRF : 脉冲串重复频率, burst repetition frequency), $l(t_m)$ 也会产生卷绕现象, 因此时频平面上的曲线方程为

$$\hat{l}(t_m) = \operatorname{mod} \left[\frac{2}{c} f_0 \rho \omega_0 \sin(\omega_0 t_m + \theta_0) + \frac{BRF}{2}, BRF \right] - \frac{BRF}{2} \quad (21)$$

Hough 变换方程可写为

$$\operatorname{mod} \left[\hat{l}(t_m) - A' \sin(2\pi \Omega_m + \zeta), BRF \right] = 0 \quad (22)$$

其中 $A' = 2f_0 \rho \omega_0/c$, $\Omega = \omega_0/(2\pi)$, $\zeta = \theta_0$.

考虑到 $S(k, t_m)|_{k=C''}$ 为正弦调频信号, 短时傅立叶变换的时频聚集性较差, 而若采用 WVD 或 SPWVD 等二次型时频分布, 交叉项的存在将严重影响时频平面曲线参数的正确提取. 因此我们采用 Gabor 变换来分解 $S(k, t_m)|_{k=C''}$. Gabor 变换被公认为信号处理中信号尤其是图形信号表示的最好方法之一^[15], 不存在交叉项的干扰, 且又能获得较好的时间和频率分辨率, 用其对 $S(k, t_m)|_{k=C''}$ 作时频分析能为后续的 Hough 变换打下良好基础.

(2) 微动点旋转(振动)频率较高的情况.

在 BRF 一定时, 旋转(振动)频率越高, 距离-慢时间平面上曲线的一个周期内的慢时间采样数越少, 若直接在距离-慢时间平面上用推广的 Hough 变换检测曲线, 准确率将下降. 此外, 随着微动点旋转(振动)频率的提高, 雷达视线方向速度 v 也随之增加, 式(6)中第三项值增大, 导致精分辨率的展宽现象加剧. 因此, 对于直升机尾翼和导弹导引尾翼等高转速旋转部件运动特征的提取, 还必须采取其他措施.

由 2.1 节的推导可知, 式(6)中的 k 事实上就是式(5)中 $S_c(\omega, i)$ 在 $\omega = -4\pi R_{\Delta 0}/c$ 时的瞬时频率, 可见当 v 在一个脉冲串时间内近似为常数时, k 与 i 成线性

关系, 即当 $\omega = -4\pi R_{\Delta 0}/c$ 时, $S_c(\omega, i)$ 为线性调频信号, 在时频平面上将呈现为直线段. 对于简单的线性调频信号, 短时傅立叶变换就足以胜任, 不仅运算简单, 而且没有交叉项的干扰.

对各次脉冲串信号获得的 $S_c(\omega, i)|_{\omega = -4\pi R_{\Delta 0}/c}$ 作短时傅立叶变换, 将获得的时频平面依次拼接组成一个新的平面, 在这个新的平面上, 旋转(振动)点的微多普勒特征仍表现为式(16)所描述的曲线形式, 曲线每个周期内的慢时间采样数为原来的 N 倍. 对其作推广的 Hough 变换, 就能获得目标的微动参数.

以上论述的是旋转和振动形式微动的微多普勒特征提取方法. 事实上, 对于其他形式的微动, 只要能写出其运动方程, 都可以推导出其在距离-慢时间平面上的曲线方程, 通过构造相应的变换方程, 就可以实现微多普勒特征的提取.

4 仿真验证

4.1 距离走动与卷绕验证

雷达信号参数: $f_0 = 35\text{GHz}$, $T_r = 78.125\mu\text{s}$, $\Delta f = 4.6875\text{MHz}$, $N = 64$, 合成带宽 $B = 300\text{MHz}$. $R_{\Delta 0} = 5\text{m}$. 由式(10)可得满足不卷绕条件的微动点运动速度范围为 $v \in (-36\text{m/s}, 18.8571\text{m/s})$. 如图 2 所示, 四个点的初始位置均位于距参考点距离 $R_{\Delta 0}$ 处, 但具有不同的瞬时速度, 距离走动效应导致其在高分辨像上的位置也就不同. 当速度 v 取接近临界值的 19m/s 时, 该点的峰值出现了分裂, 分别出现在距离像的两侧, 当 v 的取值超过式(10)限定的范围时, 如 -60m/s , 其峰值由距离像的左侧卷绕到右侧, 出现在 $v = -15\text{m/s}$ 对应峰值的右边, 并且峰值展宽现象已经比较明显.

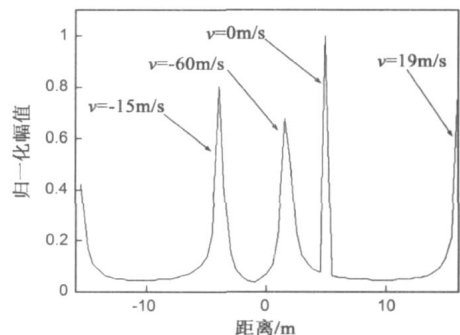


图2 微动点的距离走动与卷绕

4.2 旋转(振动)微多普勒特征验证

雷达信号参数: $f_0 = 10\text{GHz}$, $BRF = 200\text{Hz}$, 其余参数同仿真(1). 两个旋转点旋转半径均为 2m , $R_0 = -3\text{m}$. 如图 3(a) 所示, 当旋转点旋转频率分别为 2Hz 和 5Hz 时, 由式(14)可得 $|k|_{\max} = 2.6824 < \pi$ 满足不卷绕条件. 可算得两个旋转点对应曲线的振幅放大系数分别为 2.13209 倍和 5.3306 倍. 因此曲线的振幅分别为

4. 6418m 和 10. 6613m. 图 3(a) 很好的验证了这一结论 (即 2. 3 节中的结论 1).

仿真中设置 $t_m = 0. 25s$ 时 (即图 3(a) 中的 A 点时刻) 频率为 5Hz 的旋转点运动到距雷达最近处. 可算得相移 $\phi = 79. 1875^\circ$, 因此正弦曲线波谷出现在 B 时刻. 这就验证了结论 2.

当旋转点频率由 5Hz 增加到 8Hz 时, $|k|_{max} = 3. 9023 > \pi$, 正弦曲线发生卷绕, 如图 3(b) 所示. 式(16)所描述的曲线在图 3(b) 中用“*”表示, 可见其与旋转点对应的曲线十分吻合. 这就验证了 2. 3 节中的结论 3.

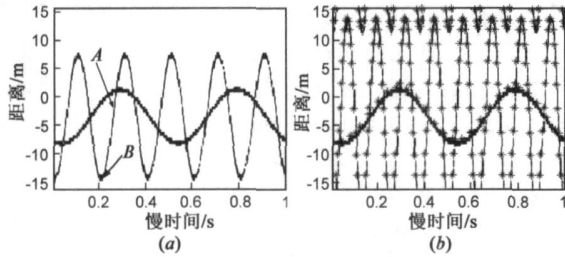


图3 旋转点微多普勒特征

4. 3 微多普勒特征提取方法验证

雷达信号参数同仿真(2). 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 $SNR = -10dB$.

(i) 直接在距离-慢时间平面上检测曲线参数

两个旋转点旋转半径均为 2m, $R_0 = -3m$, 频率分别为 2Hz 和 8Hz. 距离-慢时间平面曲线如图 3(b) 所示. Hough 变换检测到的参数如表 1, 可见准确检测到了频率分别为 2Hz 和 8Hz 的曲线, 由此算出振幅放大系数分别为 2. 3209 和 8. 4371. $\Omega = 2Hz$ 曲线 A 的取值位于 4. 5m 和 5m 之间, 取均值 4. 75m; $\Omega = 8Hz$ 曲线 A 的取值为 17m. 除以相应的放大系数后得到半径分别为 2. 0466m 和 2. 0149m, 和真实值十分接近.

表 1 距离-慢时间平面上检测到的曲线参数

序号	1	2	3	4	5
R_0	-3	-3	-3	-3	-3
A	4.5	5	4.5	5	17
Ω	2	2	2	2	8
ζ	2.6	2.6	2.7	2.7	2.9

(ii) $A < c/(4N\Delta f)$ 的情况

一个旋转点旋转半径 0. 05m, 频率 4Hz, $R_0 = -3m$. $A = 0. 2153 < c/(4N\Delta f) = 0. 25$. 其在距离-慢时间平面上表现为近似直线, 如图 4(a) 所示. 抽取直线所在行作 Gabor 变换, 得到图 4(b) 所示的时频分布. 对其作推广的

表 2 $A < c/(4N\Delta f)$ 时时频平面上检测到的曲线参数

序号	1	2	3	4
A'	78	80	78	78
Ω	4	4	4	4
ζ	1.6	1.7	1.8	1.8

Hough 变换, 得到的曲线参数如表 2 所示, 旋转点旋转频率被准确检测出来为 $\Omega = 4Hz$. $A' = 78$, 由式(22)得 $\rho = A'c/(2f_0 \cdot 2\pi\Omega) = 0. 0466m$, 与真实值接近.

(iii) 微动点旋转(振动) 频率较高的情况

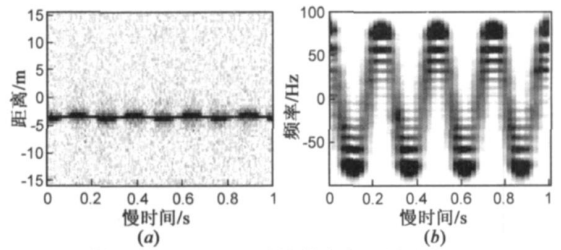


图4 $A < c/(4N\Delta f)$ 时旋转点微多普勒特征

一个旋转点旋转半径 1m, 频率 30Hz, $R_0 = -3m$. 其在距离-慢时间平面上呈现为图 5(a) 所示图像, 可见由于旋转频率过高, 直接用推广的 Hough 变换在距离-慢时间平面上提取微动参

数十分困难. 计算精分辨率依次拼接, 得到新的时频平面如图 5(b) 所示. 对新的时频平面作推广的 Hough 变换, 得到的曲线

表 3 旋转频率较高时时频平面上检测到的曲线参数

序号	1	2	3	4
R_0	-3	-3.5	-3	-2.5
A	31.5	32	32	32
Ω	30	30	30	30
ζ	3.1	3.1	3.1	3.1

参数如表 3 所示, 旋转频率被准确检测出来为 $\Omega = 30Hz$, 算出振幅放大系数为 31. 4318. $A = 32$, 除以放大系数后可得旋转半径为 1. 0181m.

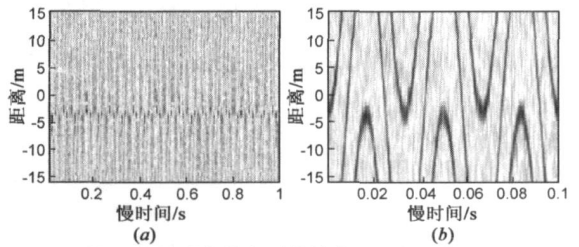


图5 旋转频率较高时旋转点微多普勒特征

5 结论

线性调频步进信号作为一种极具发展潜力的高分辨雷达信号, 在提取 ISAR 目标精细的微多普勒特征上有着独特的优势. 本文分析了线性调频步进信号中由目标微动引起的微多普勒效应, 重点讨论了由目标部件旋转和振动引起的微多普勒特征. 在推导出旋转和振动引起的微多普勒特征的解析表达式后, 通过构造 Hough 变换方程, 实现了微动特征的提取. 值得强调的是, 尽管本文只详细分析了旋转和振动微多普勒特征的提取方法, 但事实上, 对于其他形式的微动, 如锥动、进动等, 都可按照类似的方法构造 Hough 变换方程, 实

现特征的自动提取.

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 Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2– 21.
- [3] 张群, 罗斌凤, 管桦, 等. 基于微 Doppler 提取的具有旋转部件雷达成像[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1410– 1417.
- [4] V C Chen. Analysis of radar micro Doppler signature with time frequency transform[A]. Proceedings on Statistical Signal and Array Processing [C]. Pocono Manor, PA, USA: IEEE Press, 2000. 463– 466.
- [5] Chen V C, Li F. Analysis of micro Doppler signatures[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271– 276.
- [6] 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.
- [7] 陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 等. 微多普勒分析和参数估计[J]. 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]. J Infrared Millim Waves, 2006, 25(5): 360– 363. (in Chinese)
- [8] Li J, Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284– 291.
- [9] 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.
- [10] 龙腾, 毛二可, 何佩琨. 调频步进雷达信号分析与处理[J]. 电子学报, 1998, 26(12): 84– 88.
Long Teng, Mao Er-ke, HE Pei-kun. Analysis and processing of modulated frequency stepped radar signal[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(12): 84– 88. (in Chinese)
- [11] Zhang Q, Jin Y Q. Aspects of radar imaging using frequency stepped chirp signals[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2006, 2006. 1– 8.
- [12] 苏宏艳, 龙腾, 何佩琨, 等. 运动目标环境下的调频步进信号目标抽取算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(5): 915– 918.
Su Hong yan, Long Teng, He Pei-kun, et al. Target's redundancy removed algorithm for modulated frequency stepped pulse radar signal echoed by moving target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(5): 915– 918. (in Chinese)
- [13] Zhang Q, Zeng Y S, He Y Q, et al. Avian detection and identification with high resolution radar[A]. 2008 IEEE Radar Conference[C]. Rome, Italy: IEEE Press, 2008. 2194– 2199.
- [14] Hough P V C. Method and means for recognizing complex patterns[P]. U S Patent: 3, 069, 654, Dec. 1962.
- [15] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 109– 110.

作者简介:



罗迎男, 1984 年出生于湖南益阳, 现为空军工程大学电讯工程学院博士生, 已在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《电子与信息学报》等国内外学术期刊和会议录上发表论文 20 余篇. 研究方向: 雷达成像与目标识别.

E-mail: luoying2002521@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、陕西省信号处理学会理事. 发表学术论文 90 余篇, 被 SCI、EI 收录 40 余篇. 研究方向: 雷达信号处理、雷达成像和电子对抗.

E-mail: zhangqunns@gmail.com