

基于 Radon-WVD 变换的编队目标架次识别

赵学云 刘 峥

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对常规低分辨率雷达, 研究了编队目标回波的多普勒频率变化特征, 提出了采用 Radon-WVD 法, 在时频域对编队目标的整体特性(调频率)进行快速准确的估计。该方法的估计结果不但受 WVD 交叉项的影响, 而且由于 Radon 变换的积累特性使得 Radon-WVD 变换法相对 WVD 有更好的抗噪声性能。仿真实验验证了该方法的有效性, 成功地实现了多架编队飞机架次识别。

关键词: 低分辨率雷达; 架次识别; 时频分析; Radon 变换

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)03-0544-05

Target Number Detection Based on Radon-WVD Transform

Zhao Xue-yun Liu Zheng

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: In this paper, the variation of Doppler frequency of the group flying targets is analyzed. For low resolution radars, the echoes of targets can be modeled as Linear Frequency Modulated (LFM) signals. A method for detecting the number of targets is proposed. A fast estimation of character of the whole in the time-frequency domain can be obtained through the Radon-WVD (Radon-Wigner Ville Distribution). The cross-terms of WVD have no influence on the result of the estimation. The method performs well under either higher SNR or lower SNR. The experimental results demonstrate the validity of the method.

Key words: Low resolution radar; Target number detection; Time-frequency analysis; Radon transform

1 引言

在现代战争中, 来袭飞机通常采用多架编队, 为全面分析敌情, 雷达能辨别编队飞行目标的架次是十分重要的。

对于编队飞行的飞机, 它们之间的间距在几十米到数百米, 对大量的现役低分辨率雷达而言, 这些目标在距离上和空间角度上均难以分辨。唯一可能提供一定分辨能力的只有多普勒频率域, 但由于目标的多普勒频率差别也不大, 为了实现较高的多普勒频率分辨率, 就需要较长的相关处理时间, 而在这段时间内, 同一目标的多普勒频率也已发生了变化, 基于常规傅氏变换的多普勒滤波对此无能为力。

文献[1-3]提出用超分辨的 RELAX 参数化方法对编队目标的架次进行识别, 该方法不仅对噪声较为敏感, 而且对编队目标中每个目标的分辨都需要做多次的三维搜索(即搜索每个目标回波的幅度、多普勒频率和调频率)和迭代, 所以在目标较多时计算量将大大增加。文献[4,5]考虑到编队目标回波频率的时变性, 尝试采用时频分析法在时频域直接对编队目标的架次进行识别, 但由于 WVD 时频分析结果中交叉项的存在, STFT 时频分析的时、频分辨力受窗长的影响, 以及各种时频分析法所固有的缺点使得在时频域直接对编

队目标架次进行识别的效果不是很好。

鉴于以上原因, 本文采用 Radon-WVD 变换^[6,7]在时频域对编队目标的整体特性(即各目标回波有近似相同的多普勒调频率)进行估计, 并利用估计结果在时域对回波进行 dechirping 处理, 以减小相干时间内单个目标回波频谱的展宽, 最后通过傅里叶变换, 在频率域对编队目标架次进行正确识别。

本文第 2 节详细分析了编队飞行目标的多普勒频率变化特征, 说明了用一组调频率近似相同的线性调频信号来描述编队飞行目标回波的多普勒频率的变化是足够准确的。第 3 节分析了调频率相同的线性调频信号时频分析(WVD)结果中自项及交叉项的特点, 以及在此基础上进行 Radon-WVD 变换的可行性。第 4 节进行了仿真试验, 证明了该方法的有效性, 成功地实现了多架编队飞机架次识别。

2 编队目标的多普勒频率变化分析

2.1 单个目标的多普勒频率变化分析

雷达目标关系如图 1, 单个雷达目标的多普勒频率取决于雷达的波长 λ , 目标的速度 v 以及目标飞行方向与雷达视线的夹角 φ , 即

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \cdot \cos \varphi \quad (1)$$

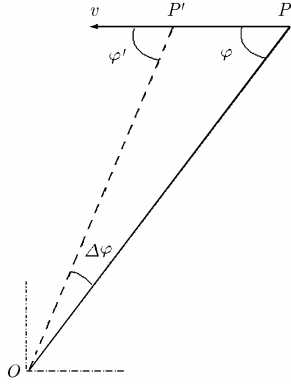


图1 单目标回波的多普勒频率变化

随着目标沿速度方向从 P 点运动至 P' , 目标飞行方向与雷达视线的夹角也由 φ 变化到 φ' , 所以即使是匀速飞行的目标, 由于不同时刻目标航向与雷达视线夹角的变化, 目标回波的多普勒频率也是时变的。对多普勒频率取时间的一次导数, 可得多普勒频率的一次变化率为^[2,4]

$$\begin{aligned} \frac{df_d}{dt} &= -\frac{2v}{\lambda} \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{2v}{\lambda} \cdot \sin \varphi \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{vt}{R} \cdot \sin \varphi \right) \\ &\approx -\frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{v}{R} \cdot \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, 利用了脉冲积累时间内, $PP' = vt \ll R$,

$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{d(\Delta\varphi)}{dt}$, $\Delta\varphi = \frac{vt \cdot \sin \varphi}{R}$, 忽略了更高次的 $\frac{v}{R}$ 项。式(2)表明, 在 $\varphi = \frac{\pi}{2}$, 即当目标做切向飞行时, 多普勒频率变化最快。以第4节参数为例, 计算单个目标的最大调频率如下:

$$\left. \frac{df_d}{dt} \right|_{\max} = -\frac{2v^2}{\lambda \cdot R} = -\frac{2 \times 250^2}{0.1604 \times 40 \times 10^3} \approx -19.5 \text{ (Hz/s)} \quad (3)$$

为进一步分析单个目标多普勒频率的变化情况, 可对多普勒频率取时间的二次导数, 则得到普勒频率的二次变化率:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f_d}{dt^2} &= \frac{2v^2}{\lambda \cdot R} \cdot 2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \frac{d\varphi}{dt} \approx \frac{4v^3}{\lambda \cdot R^2} \cdot \cos \varphi \cdot \sin^2 \varphi \\ &= \frac{2v^3}{\lambda \cdot R^2} \cdot \sin 2\varphi \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

以第4节参数为例:

$$\text{当 } \varphi = 0, \frac{\pi}{2} \text{ 时, } \frac{d^2 f_d}{dt^2} = 0 \text{ (Hz/s}^2\text{);}$$

$$\begin{aligned} \text{当 } \varphi = \frac{\pi}{4} \text{ 时, } \frac{d^2 f_d}{dt^2} \text{ 取得最大值, } \left. \frac{d^2 f_d}{dt^2} \right|_{\max} &= \frac{2v^3}{\lambda \cdot R^2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \\ &= \frac{2 \times 250^3}{0.1604 \times 40^2 \times 10^6} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.086 \text{ (Hz/s}^2\text{)}. \end{aligned}$$

由以上分析可知, 多普勒频率的二次变化率相对其一次变化率而言是非常小的, 若忽略不计, 则二次变化率与一次变化率的比值就表示了目标多普勒频率的变化对线性调频模型的偏离程度, 计算如下:

$$\frac{d^2 f_d}{dt^2} \bigg/ \frac{df_d}{dt} = \frac{2v}{R} \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

仍以第4节参数为例, 目标多普勒频率的变化对线性调频模型的偏离最大为 0.004 ($\cos \varphi = 1$ 时偏离值为 0.004, 实际中 $\cos \varphi$ 远远小于 1, 故其偏离值也很小, 一般为 10^{-4} 的数量级)。故在相关处理时间内, 单个目标的多普勒频率的变化可以用线性调频模型来描述, 该描述是足够准确的。

2.2 编队目标的多普勒频差分析

两个目标的情况下, 雷达与目标的关系如图2。由于编队目标的速度近似相同, 它们回波的多普勒频率差别就取决于各自与雷达视线夹角的不同, 即

$$\Delta f_d = f_{d1} - f_{d2} = \frac{2v}{\lambda} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (6)$$

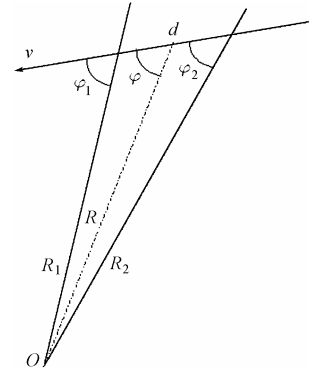


图2 两目标的多普勒频率差

而 φ_1 与 φ_2 的不同又是由两个目标的间距 d 和目标距离 R 所决定的, 一般情况下 R 远远大于 d , 因此 φ_1 和 φ_2 的差别是很小的, 进一步对式(6)进行化简, 有

$$\begin{aligned} \Delta f_d &= f_{d1} - f_{d2} = \frac{2v}{\lambda} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \\ &= \frac{2v}{\lambda} \cdot \left(-2 \sin \left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \cdot \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \right) \\ &= -\frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{d}{R} \cdot \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

上式中, 利用了当 $R \gg d$ 时, $\sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \approx \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} = \frac{1}{2} \frac{d}{R} \sin \varphi$, $\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ 是平均的雷达视线与飞行方向的夹角。从式(7)可以看出, 当 $\varphi = \pi/2$, 即目标沿切线方向飞过雷达时, 两目标的多普勒频率差别最大。仍以第4节参数为例, 两目标的多普勒频率差最大值为 $\Delta f_d \big|_{\max} = \frac{2v}{\lambda} \cdot \frac{d}{R} \approx 7.79 \text{ Hz}$, 因此, 若要采用傅里叶变换来分辨这两个目标, 则至少需要 $T = \frac{1}{\Delta f_d \big|_{\max}} = 0.13 \text{ s}$ 的回波信号, 比目标未沿切线方向飞行时所需的时间还要长。

由式(2)和式(7)可知, 在利用傅里叶变换分辨两个目标所需的相干时间 T 内, 单个目标的多普勒频率变化为 $\delta f_d = \frac{df_d}{dt} \cdot T = \frac{2v^3}{\lambda R} \cdot \frac{\lambda R}{2vd} = \frac{v}{d}$, 以上述参数为例, 在相关时间

$T=0.13\text{s}$ 内, 单个目标的多普勒频率变化为 2Hz , 这几乎与两目标间的多普勒频差 Δf_d 相等, 所以如果不对回波进行解线性调频(dechirping), 直接用傅里叶变换, 则两个目标的频谱是严重混叠在一起而无法分辨的。

分析两个目标回波的多普勒调频率差为

$$\begin{aligned}\Delta \frac{df_d}{dt} &= \frac{df_{d1}}{dt} - \frac{df_{d2}}{dt} = -\frac{2v^2}{\lambda R} \cdot (\sin^2 \varphi_1 - \sin^2 \varphi_2) \\ &= \frac{2v^2}{\lambda R} \cdot \frac{\cos 2\varphi_1 - \cos 2\varphi_2}{2} \\ &= \frac{2v^2}{\lambda R} \cdot (\sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \sin(\varphi_1 - \varphi_2)) \\ &\approx \frac{2v^2}{\lambda R} \cdot \frac{d}{R} \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\varphi\end{aligned}\quad (8)$$

以第4节参数为例。当 $\varphi = \pi/2$ 时, $\Delta \frac{df_d}{dt} = 0$; 当 $\varphi = \pi/4$

时, $\Delta \frac{df_d}{dt}$ 取得最大值, $\Delta \frac{df_d}{dt}|_{\max} = 0.03(\text{Hz/s})$; 当

$\varphi \neq \pi/4$ 时, $\Delta \frac{df_d}{dt}$ 迅速变小。所以编队目标各目标回波的

调频率的差值 $\Delta \frac{df_d}{dt}$ 通常很小, 一般为 10^{-4} 的数量级, 与单目标回波的多普勒频率的调频率 $\frac{df_d}{dt}$ 及多目标回波的频率差 Δf_d 相比是可以忽略不计的。故编队目标中速度相同的多个目标的回波可以用一组调频率近似相同的线性调频信号来描述。

3 Radon-WVD 变换原理

3.1 多分量线性调频信号的 WVD 交叉项分析

基于第1节的分析, 编队目标的回波可写成下列形式:

$$x(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t) = \sum_{m=1}^M \exp\left[j\omega_m t + j\frac{\mu}{2} t^2\right] \quad (9)$$

式(9)中: M 表示编队目标中的目标总个数, $x_m(t)$ 表示编队目标中第 m 个目标的回波。 $x(t)$ 的 WVD 定义如下^[6,7]:

$$\begin{aligned}\text{WVD}_x(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^M \text{WVD}_{x_m}(t, \omega) \\ &+ \frac{1}{2\pi} 2 \sum_{m=1}^M \sum_{n=m+1}^M \text{WVD}_{x_m, x_n}(t, \omega)\end{aligned}\quad (10)$$

式(10)的第1部分由 M 个自项组成, 即各分量自身的 WVD 分布; 第2部分由 $M \times (M-1)/2$ 个交叉项组成, 即 M 个分量中任意两个的互 WVD 分布。

将式(9)代入式(10), 可得第 m 个分量的自项为

$$\begin{aligned}\text{WVD}_{x_m}(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[j(\omega_m + \mu \cdot t)\tau] \cdot \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ &= \delta(\omega - \omega_m - \mu \cdot t)\end{aligned}\quad (11)$$

即第 m 个分量自项的瞬时频率是 $\omega_{mm}(t) = \omega_m + \mu \cdot t$, 在时频平面是一条初始频率为 ω_m , 斜率为 μ 的直线。第 m 个分

量和第 n 个分量的交叉项为

$$\begin{aligned}2\text{WVD}_{x_m, x_n}(t, \omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[x_m^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) x_n \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + x_n^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) x_m \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} A(t, \tau) \cdot \exp(-j\omega\tau) d\tau\end{aligned}\quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned}A(t, \tau) &= x_m^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \cdot x_n \left(t + \frac{\tau}{2} \right) + x_n^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \cdot x_m \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \\ &= \exp\left[j(\omega_n - \omega_m) \cdot t + j\frac{\omega_n + \omega_m}{2} \cdot \tau + j\mu \cdot t \cdot \tau \right] \\ &\quad + \exp\left[j(\omega_n - \omega_m) \cdot t + j\frac{\omega_n + \omega_m}{2} \cdot \tau + j\mu \cdot t \cdot \tau \right] \\ &= \exp\left[j\left(\frac{\omega_n + \omega_m}{2} + \mu \cdot t \right) \cdot \tau \right] \cdot \cos(\omega_m - \omega_n)t\end{aligned}\quad (13)$$

将式(13)代入式(12)整理可得式:

$$\begin{aligned}2\text{WVD}_{x_m, x_n}(t, \omega) &= \delta\left(\omega - \frac{\omega_n + \omega_m}{2} - \mu t \right) \\ &\quad \cdot \cos(\omega_m - \omega_n)t\end{aligned}\quad (14)$$

即第 m 个分量与第 n 个分量的交叉项的瞬时频率 $\omega_{m,n}(t) = (\omega_m + \omega_n)/2 + \mu \cdot t$, 在时频平面上是一条初始频率为 $(\omega_m + \omega_n)/2$, 调频率为 μ 时隐时现的虚直线 ($\cos(\omega_m - \omega_n)t$ 使得交叉项的能量分布呈振荡型, 即在时频平面的间断性)。

由以上分析可知: 一组(M 个)调频率相同而初始频率不同的线性调频信号的 WVD 结果在时频平面为: M 条斜率为 μ , 初始频率为 $\omega_1 \leq \omega_2 \leq \dots \leq \omega_M$ 的平行实直线(由 M 个分量的自项产生); $M \times (M-1)/2$ 条斜率为 μ , 初始频率为

$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \leq \frac{\omega_1 + \omega_3}{2} \leq \dots \leq \frac{\omega_{M-1} + \omega_M}{2}$ 虚直线(由 $M \times (M-1)/2$ 个分量的自项产生)。

图3为3个调频率相同, 初始频率不同的 LFM 信号的 WVD 分布图。时频平面中自上而下的第1、3、6条直线显然为实直线(连续的), 分别是3个线性调频分量的自项形成; 第2、4、5条直线是虚直线(间断的), 分别是第1个和第2个线性调频信号, 第1个和第3个线性调频信号及第2个和第3个线性调频信号的交叉项形成。

3.2 Radon-WVD 变换的定义

为准确检测 LFM 信号在时频平面的倾斜角度, 本文采用了 Radon-WVD 变换。Radon 变换是一种积分投影变换, 任意二维函数 $f(t, \omega)$ 的 Radon 变换为^[7-9]

$$\mathcal{R}[f(t, \omega)] = \int_{\text{PQ线}} f(u \cdot \cos \alpha - v \cdot \sin \alpha, u \cdot \sin \alpha + v \cdot \cos \alpha) dv \quad (15)$$

式(15)中 \mathcal{R} 表示 Radon 变换, 其积分路径如图4所示: 若用信号 $x(t)$ 的 WVD 取代函数 $f(t, \omega)$, 则所得到的 Radon

变换就是信号 $x(t)$ 的 Radon-WVD 变换(Radon-Wigner-Vill

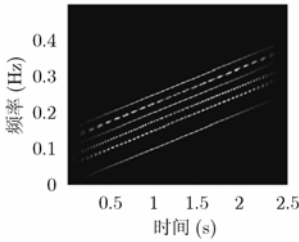


图 3 多分量线性调频信号的 WVD 分布

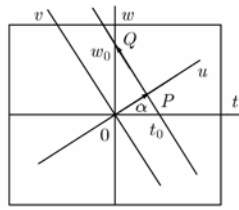


图 4 Radon 变换的积分路径

Distribution transform), 用符号 $RWVD_x(u, \alpha)$ 表示,

$$RWVD_x(u, \alpha) = \mathcal{R}[WVD_x(t, f)] = \int_{PQ \text{线}} WVD_x(u \cdot \cos \alpha - v \sin \alpha, u \sin \alpha + v \cos \alpha) dv$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WVD_x(u' \cos \alpha - v' \sin \alpha, u' \sin \alpha + v' \cos \alpha) \delta(u - u') du' dv' \quad (16)$$

当 $u' = u$ 时, Radon-WVD 变换的积分路径即为 PQ 线。

3.3 Radon-WVD 变换的意义

为表述方便, 采用截距 f_0 和斜率 r 为参数表述 WVD 时频平面中的直线。在求沿直线 $f = f_0 + rt$ 的积分时, 可将图 4 中的积分路径(直线 PQ)参数 (u, α) 替换成 (f_0, r) , 这两对参数的关系为 $r = -\cot \alpha, f_0 = u/\sin \alpha$, 由式(16)求信号 $x(t)$ 的 Radon-WVD 变换, 并以参数 (f_0, r) 表示其积分路径, 则有

$$RWVD_x(u, \alpha) = \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WVD_x(t, f) \cdot \delta(f - f_0 - rt) df dt$$

$$= \frac{1}{|\sin \alpha|} \int_{-\infty}^{+\infty} WVD_x(t, f_0 + rt) dt \Big|_{\substack{r = -\cot \alpha \\ f_0 = u/\sin \alpha}} \quad (17)$$

式(17)表明, 若 $x(t)$ 是参数为 f_0 和 r 的 LFM 信号, 则积分值最大; 而当参数偏离 f_0 或 r 时, 积分值迅速减少, 即对一给定的 LFM 信号, 其 Radon-WVD 变换会在相应的参数 (f_0, r) 处出现尖峰, 由于 Radon 变换是以旋转角度 α 和半径 u 为参数的, 因此, 通过检测 Radon-WVD 的最大值位置, 即可确定 WVD 时频平面中的直线倾角。

除了用 Radon-WVD 变换检测时频平面中直线倾角外, 还可采用 Radon-STFR^[9](或 Radon 变换与其它 Cohen 类时频分布相结合的变换^[10]), 但 WVD 的时频分辨率达到了时频分辨理论值的下限, 这一优良特性在编队目标各目标回波的多普勒频率差别较小的情况下更是 STFT 所无法企及的^[9]。此外, 由式(13)可知, 在多分量信号的各分量均为 LFM 信号且调频率近似相同的情况下, 交叉项的线性调频率也与这组 LFM 的近似相同, 所以交叉项的存在并不影响 Radon-WVD 变换对时频平面中直线倾角检测的结果。

Radon 变换本质上是沿二维平面中不同直线方向上的线积分, LFM 信号的 WVD 沿分布的长对称轴方向上的幅值, 比沿同一方向其它轴上的幅值要大, 这就保证了 Radon 变换能正确地检测出 LFM 信号在时频平面的倾角。当信号受白噪声污染时, 只要 SNR 不是太低(譬如 -15dB 以下, 但鲜见于实际问题中), 仍能保证检测结果的正确性。这是由于白噪声趋于均匀地布满整个时频平面, 而信号的 WVD 分布则比较集中, 信号的分布显然是时频平面中的占优分布。在一个很宽的 SNR 范围内(10 ~ -10dB)进行了 $2 \times 100 \times 8 = 1600$ 次 Monte-Carlo 试验(对 2 种不同的线性调频信号在 10 ~ -10dB 之间共 100 个 SNR 环境下进行试验, 在相同的 SNR 下做 8 次), 尽管在 $SNR \leq -10dB$ 时, WVD 的结果中的斜线组几乎无法看见, 但 Radon-WVD 变换的结果仍是正确的, 用该结果对回波数据进行 dechirping 后, 并做傅里叶变换(Fourier-transform), 仍可以在频率域对目标架次进行清晰准确的识别。

4 仿真试验

编队目标为两架飞机, 目标间距 $d=100m$, 速度 $v=900$ km/h(250m/s), 飞行高度 $R=40000m$, 雷达工作频率 $f_0=1870MHz$, 脉冲重复频率 $F_r=400Hz$, 脉冲积累数 $M=256$ 个, 雷达工作在等 STC, 等 T 的方式。

图 5(a)~5(d) 是 SNR=10 dB 时回波的处理过程。对回波数据直接做 FFT 的结果做局部放大后如图 5(a), 从图中可以看出, 由于单目标回波频谱的展宽, 两个目标回波的频谱已严重地混叠在一起, 无法分辨。图 5(b) 是回波的 WVD 结果, 从该图也可以看出, 在时频域, 编队目标的回波为一组平行的直线(初始频率不同, 调频率近似相同的 LFM 信号), 但由于噪声和交叉项(尤其是目标较多时)的影响, 以及编队目标的各目标在某时刻的多普勒频率差别较小, 直接在时频图中分辨目标的架次是不可能的。图 5(c) 图是对 5(b) 图做 Radon 变换(即 Radon-WVD)的结果, 横轴为 Radon 变换的旋转角度(单位: 度), 从图 5(c) 可以明显看出, 在 94°

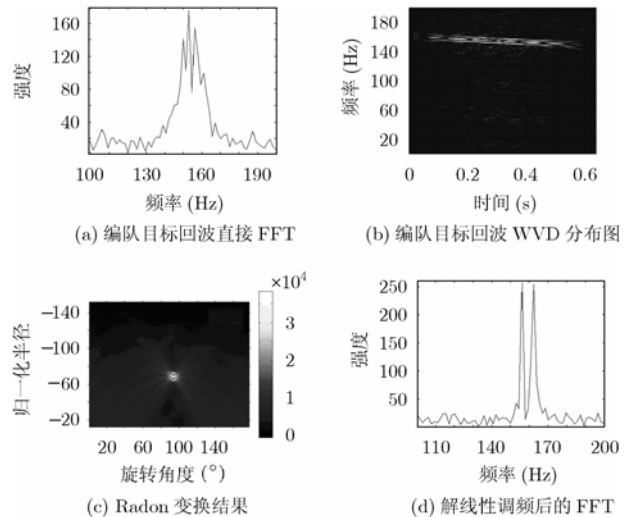


图 5 SNR=10dB 回波处理过程

处(对应于直线的倾角 $\beta = 90^\circ - 94^\circ = -4^\circ$)出现了 3 个亮点(尖峰), 中间最亮的点是交叉项的能量积累结果, 上下两个亮点是两个自项的能量积累结果, 由此得到编队目标回波的

调频率估计值 $\hat{\mu} = \text{tg}\left(\frac{\beta \cdot \pi}{180}\right) \cdot \frac{F_r}{2 \cdot M \cdot T_r} = 10.9261 \text{ Hz/s}$, 图 5(d)是用 $\hat{\mu}$ 对回波数据去斜调(dechirping)后直接 FFT 的结果的局部放大图, 从图中可以清晰地看出架次识别的结果为两个目标。

图 6(a)~6(d)是 SNR=-10dB 时回波的处理过程。图 6(a)是两目标回波数据直接做 FFT 并做局部放大的结果图。图 6(b)是此时回波的 WVD 结果, 与图 5(b)相比较, 可以看出: 当信噪比减小时, WVD 的分辨效果明显变差, 从图 6(b)中甚至无法看到目标的存在。图 6(c)是对图 6(b)做 Radon 变换的结果, 从图中仍可以清晰看到 Radon 变换能量最集中时对应的角度 $\beta' = 90^\circ - 94^\circ = -4^\circ$ 。图 6(d)是对 SNR=-10dB 时的回波数据去斜调(dechirping)后直接 FFT 后的局部放大图。由图 6(d)图仍可以直接看出架次的结果为两个目标。比较图 5 与图 6, 可以看出, 与 WVD 时频法相比, Radon-WVD 法有更好的抗噪声性能。

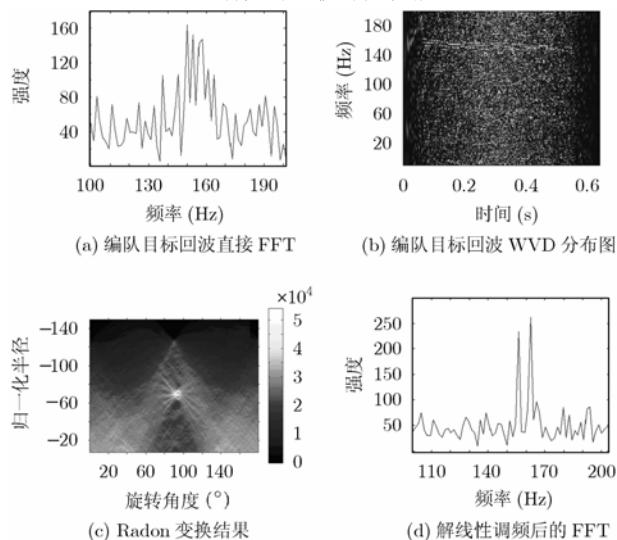


图 6 SNR = -10dB 回波处理过程

5 结束语

本文详细分析了编队目标的多普勒频率变化规律, 得出了编队目标的多普勒频率变化可以用一组调频率近似相同的线性调频信号来描述的结论。提出采用 Radon-WVD 变换可以在不抑制 WVD 交叉项的情况下, 对该组线性调频信号的调频率进行精确估计, 利用估计结果对编队目标回波数据进行 dechirping 处理, 然后通过傅里叶变换可在频率域对编队目标的架次进行识别。该方法实现了时频域搜索、时域解线性调频与频域分辨相结合, 充分利用了编队目标回波多

普勒频率的整体变化特征, 而且 Radon 变换的积累性使得 Radon-WVD 变换法比单纯的 WVD 时频分析具有更好的抗噪声性能。仿真实验证明了该方法的有效性, 并成功地实现了多架编队飞机架次识别。

参考文献

- [1] 邢孟道, 保铮. 低分辨雷达的一维横向成像及提高分辨率的方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(6): 700-704.
Xing Meng-dao and Bao Zheng. One dimensional cross-range imaging and the method of improving resolution for a low resolution radar target. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2000, 27(6): 700-704
- [2] 姜正林, 保铮等. 低分辨雷达编队目标分辨新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2001, 28(4): 482-486.
Jiang Zheng-lin, Bao Zheng, et al. Resolving multiple targets of the low resolution radar. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2000, 27(6):700-704
- [3] 苏晋, 陈付彬等. 基于 Relax 谱估计的波束内多目标分辨[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(11): 1314-1317.
Su Jin, Chen Fu-bin, et al. Multiple moving targets resolving based on relax spectrum estimation. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(11): 1314-1317
- [4] 孙晓兵, 保铮等. 时-频信号分析与雷达的多目标分辨[J]. 系统工程与电子技术, 1997, 19(11): 12-16.
- [5] 姬红兵, 李杰等. 基于分数阶傅立叶变换的编队目标架次识别[J]. 西安电子科技大学学报, 2000, 27(4): 482-486.
- [6] 胡昌华, 周涛等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——时频分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000, 164-167, 112-113.
- [7] Wood J C, Barry D T. Linear signal synthesis using the Radon-Wigner transform. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(8): 2105-2111.
- [8] Wood J C, B D T. Radon transformation of time-frequency distribution for analysis of multi-component signals[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994, 42(11): 3166-3177.
- [9] 邹红星, 周小波等. 基于 Radon-STFT 变换的含噪 LFM 信号子空间分解[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 4-8.
- [10] Wang Minsheng, Chen A K, and Chui Charles K. Linear frequency-modulated signal detection using radon-ambiguity transform[J]. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998, 46(3): 571-586.

赵学云: 女, 1977年生, 硕士, 研究方向为多目标分辨、雷达信号处理等。

刘 峰: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高分辨雷达信号处理和系统设计。