

一种基于全极化回波的 微多普勒增强算法

孙 挺¹,程 旭²

(1. 周口师范学院网络工程学院,河南周口 466000;
2. 国防科技大学电子科学与工程学院电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室,湖南长沙 410073)

摘 要: 极化信息的有效利用可提高目标特征提取和识别的精度. 针对微动目标的微多普勒提取问题,在介绍传统微多普勒提取算法的基础上,建立了微动目标的全极化回波模型,提出了一种基于全极化信息的微多普勒提取算法. 该方法以时频图像的对比度作为目标函数,通过寻找一组最优极化矢量提高时频图像质量. 仿真数据实验表明,本文方法比传统时频变换方法得到的时频图像的对比度更高. 真实数据实验发现,本文方法得到的图像对比度高达 2.56,而传统时频变换方法得到的图像对比度在 0.88 到 1.66 之间. 实验结果证明了本文方法的有效性和相比传统方法的优势.

关键词: 微多普勒; 全极化; 图像对比度; 最优极化

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2071-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.003

A Novel Method of Micro-Doppler Signature Enhancement Based on Full Polarization Echoes

SUN Ting¹, CHENG Xu²

(1. College of Network Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou, Henan 466000, China;
2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System,
College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: The effective use of polarization information can improve the precision of target feature extraction and recognition. Aiming at the problem of extracting the micro-Doppler frequency of micro-motion targets, after introducing the traditional micro-Doppler extraction method, the full-polarization echo model of micro-motion targets is built, and then a full polarization-based micro-Doppler extraction algorithm is proposed. Such algorithm takes the time-frequency image contrast as the objective function and improves the time-frequency image quality by seeking for the optimal polarization vectors. The simulation results show that the proposed method can obtain a higher image contrast than the traditional time-frequency method. Furthermore, the real data demonstrates that the image contrast obtained by the proposed method is 2.56, compared with 0.88 to 1.66 of the traditional method. All the experimental results confirm the effectiveness of the proposed method and its advantages over the traditional method.

Key words: micro-Doppler; full polarization; image contrast; optimal polarization

1 引言

在螺旋桨飞机、喷气式飞机和弹道导弹等目标的运动中,除了质心的平动外,还有目标或目标部件相对质心的微运动. 微运动与目标或目标上部件的结构尺

寸、质量分布和受力状态等微动力学特性密切相关,它引起的雷达回波中多普勒频率的调制称为微多普勒效应^[1]. 提取目标的微多普勒特征进而得到与目标物理属性相关的特征量对弹道导弹防御、防空作战和战场监视等领域中的目标识别具有重要意义^[2].

极化是电磁波除幅度、频率和相位以外的一个重要基本参量,极化信息在雷达抗杂波、抗干扰、反隐身、目标特征提取与识别等领域具有重要的应用潜力,雷达专家们很早就认识到利用极化信息可以显著改善其目标探测和识别能力.当前,目标极化增强理论在极化合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[3,4]、极化逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)^[5]等领域获得了长足的发展并在工程中得到广泛应用.研究和实践表明,充分利用极化信息可以显著改善雷达抗干扰和目标识别能力.在利用全极化信息进行目标微动特征提取的研究方面,美国 Villanova 大学的 Zhang Yimin 提出了极化时频分布(Polarimetric Time-Frequency Distribution, PTFD)的信号建模和处理方法,利用该方法可同时检测目标运动的微多普勒及极化时变特征,仿真实验表明该方法对目标检测和识别概率均有提高^[6];美国陆军实验室的 Dave Tahmouh 和 Jerry Silvius 利用全极化雷达开展了人体运动的微多普勒提取研究^[7,8],获取了各种运动类型下的全极化回波数据,实测数据显示,当人的手臂处于抬起状态时,不同极化通道的微动测量结果差异较大,这对于持枪恐怖分子和人质的鉴别具有重要意义^[8].

国外学者对于微多普勒提取的全极化信息挖掘表明,极化对于微动特征提取和增强具有重要的应用潜力.本文在介绍了传统微多普勒提取算法基本流程的基础上提出了基于全极化信息的微多普勒提取算法.该算法从本质上来说是通过目标极化优化增强回波分量,抑制噪声和干扰,进而提高时频面的图像质量.仿真实验和利用实测数据的分析验证了该算法的良好性能.

2 传统微多普勒提取算法

如图 1 所示,目标体上一散射点初始时刻位于空间中 P 点, t 时刻运动到 P'' ,这一过程可以分解为两步:首先,散射点随目标质心平动到 P' 点,然后,由于目标的微运动,散射点由 P' 点运动到 P'' 点,即

$$\begin{aligned} \overrightarrow{QP''} &= \overrightarrow{QO} + \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'P''} \\ &= \mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 \mathbf{R}_{md} 即为目标姿态改变(也即微动)引起的散射点位移改变量.于是,目标到雷达的距离为

$$\begin{aligned} r(t) &= \|\overrightarrow{QP''}\| \\ &= \|\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}}\| \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\|\cdot\|$ 代表欧式范数.

传统微多普勒特征提取均假定目标为理想点散射模型,设雷达发射中心频率为 f 的正弦波,目标的基带回波为

$$\begin{aligned} s(t) &= \rho(x, y, z) \exp(j2\pi f[2r(t)/c]) \\ &= \rho(x, y, z) \exp(j\Phi[r(t)]) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $\rho(x, y, z)$ 为目标在雷达坐标系下定义的点散射函

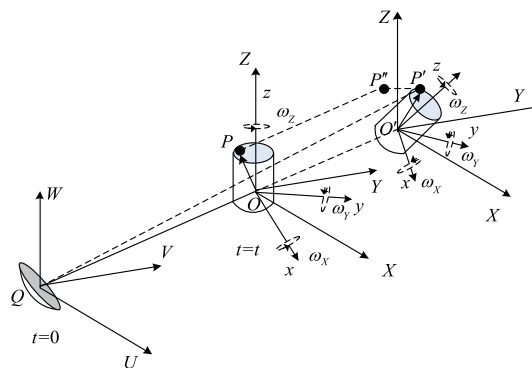


图1 目标微动示意图

数.根据式得到,接收回波基带信号相位为

$$\Phi[r(t)] = 2\pi f \frac{2r(t)}{c} \quad (4)$$

其中 c 为光速,而目标运动引起的多普勒频率为相位对时间的导数,即

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{2f}{c} \frac{dr(t)}{dt} \\ &= \frac{2f}{c} \frac{1}{2r(t)} \frac{d}{dt} [\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}}]^T (\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}})^T \mathbf{n} \\ &= \frac{2f}{c} - \left[\frac{d}{dt} \mathbf{R}_{\text{trans}} + \frac{d}{dt} \mathbf{R}_{\text{md}} \right]^T \mathbf{n} \\ &= \frac{2f}{c} \left[\frac{d}{dt} \mathbf{R}_{\text{trans}} \right]^T \mathbf{n} + \frac{2f}{c} \left[\frac{d}{dt} \mathbf{R}_{\text{md}} \right]^T \mathbf{n} \\ &= f_{\text{trans}} + f_{\text{md}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}}}{\|\mathbf{R}_0 + \mathbf{R}_{\text{trans}} + \mathbf{R}_{\text{md}}\|}$ 为 $\overrightarrow{QP''}$ 的单位矢量.根据式(5),具有微运动属性的目标多普勒由两部分组成,一部分是质心平动引起的多普勒,另一部分是微运动引起的多普勒,即微多普勒.

文献[1]证明几类基本微运动形式(包括振动、旋转、锥旋)引起的微多普勒具有三参数正弦调频信号的形式,即

$$f_{\text{md}}(t) = k_0 \sin(\omega_0 t + q_0) \quad (6)$$

其中 k_0 为幅度调制因子, ω_0 为频率调制因子, q_0 为初相.通常采用时频分析处理对回波进行时频变换提取目标的微多普勒信息,对信号 $s(t)$ 进行时频变换后的 Cohen 类时频分布为

$$\begin{aligned} S(t, f) &= \iint \varphi(t-u, \tau) \cdot \\ & s\left(u + \frac{\tau}{2}\right) \times s^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\varphi(t, \tau)$ 为核函数.

3 基于全极化信息的微多普勒增强算法

根据上一节的描述可知,传统微多普勒提取算法基于理想点散射模型假设,在其建模中未考虑目标散

射特性改变及噪声、杂波干扰等实际因素对回波相位的调制作用. 对于这种情况, 本节将首先建立全极化条件下微动目标的完整回波模型, 然后引入时频分布的性能指标, 在此基础上提出以时频分布性能指标为目标函数的全极化微多普勒优化方法.

3.1 全极化微动目标回波模型

假设全极化雷达系统同时发射载频为 f 的水平 (H) 和垂直 (V) 极化信号, 对非理想点散射目标体, 依然考虑图 1 中散射中心 P , 雷达对两路发射信号同时接收, 这样一次接收可获得信号极化散射矩阵所需的完整四路分量信号, 令 t 时刻雷达接收信号极化散射矩阵为 $\mathbf{Z}(t)$, 有

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} z_{\text{HH}}(t) & z_{\text{HV}}(t) \\ z_{\text{VH}}(t) & z_{\text{VV}}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 ij 表示 i 极化发射 j 极化接收, $i, j \in \{\text{H}, \text{V}\}$.

设 t 时刻散射中心 P 的极化散射矩阵为 $\mathbf{Y}(t)$, 即

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \sigma_{\text{HH}}(t) & \sigma_{\text{HV}}(t) \\ \sigma_{\text{VH}}(t) & \sigma_{\text{VV}}(t) \end{bmatrix}, \text{ 雷达接收机噪声为}$$

$$\mathbf{N}(t) \begin{bmatrix} n_{\text{HW}}(t) & n_{\text{HV}}(t) \\ n_{\text{VH}}(t) & n_{\text{VV}}(t) \end{bmatrix}, \text{ 则有}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(t) &= \mathbf{Y}(t) \left\{ \exp \left[j2\pi f \frac{2r(t)}{c} \right] + \mathbf{N}(t) \right\} \\ &= \mathbf{Y}(t) \exp \{ j\phi r(t) \} + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

结合式(6), 进一步有

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}(t) &= \mathbf{Y}(t) \exp \left(-j \frac{2\pi k_0}{w_0} \cos(w_0 t + \theta_0) \right) \\ &\quad + \mathbf{N}(t) \end{aligned} \quad (10)$$

利用式(7)对式(10)进行时频变换, 得到其时频分布为

$$\boldsymbol{\Psi}(t, f) = \begin{bmatrix} Z_{\text{HH}}(t, f) & Z_{\text{HV}}(t, f) \\ Z_{\text{VH}}(t, f) & Z_{\text{VV}}(t, f) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $Z_{pq}(t, f)$ 为

$$\begin{aligned} Z_{pq}(t, f) &= \iint \varphi(t - u, \tau) \times \\ &\quad z_{pq} \left(u + \frac{\tau}{2} \right) z_{pq}^* \left(u - \frac{\tau}{2} \right) e^{-j\pi f \tau} du d\tau \end{aligned} \quad (12)$$

$p, q \in \{\text{H}, \text{V}\}$.

根据式(9) ~ (12) 可见, 目标散射特性 $\mathbf{Y}(t)$ 和噪声项 $\mathbf{N}(t)$ 的改变, 将与目标和雷达间距离引起的相位项 $\Phi[r(t)]$ 发生耦合作用, 如此会降低经时频变换后的目标的微多普勒性能.

3.2 全极化微多普勒时频分布的优化方法

利用目标的极化特性可增强目标分辨能力, 降低噪声和杂波等干扰对目标的影响, 这在目标的虚拟极化适配、最优极化及极化增强等领域得到利用和证明. 基于相似的原理, 本文给出一种以时频分布评价指标

为目标函数的全极化微多普勒优化方法.

对于给定极化散射矩阵 \mathbf{S} , 将其在 Pauli 矩阵基下展开, 表示成极化散射矢量的形式. 已知 Pauli 矩阵基为

$$\boldsymbol{\psi} = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & j \\ j & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

简记式(8)中 $\mathbf{Z}(t)$ 为 \mathbf{Z} , 则雷达回波时域散射矩阵的 Pauli 分解为

$$\mathbf{z}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} [z_{\text{HH}} + z_{\text{VV}}, z_{\text{HH}} - z_{\text{VV}}, z_{\text{HV}} + z_{\text{VH}}]^T \quad (14)$$

又根据互易性原理, 单站条件下有 $z_{\text{HV}} = z_{\text{VH}}$, 所以式(14)可写为

$$\mathbf{z}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} [z_{\text{HH}} + z_{\text{VV}}, z_{\text{HH}} - z_{\text{VV}}, 2z_{\text{HV}}]^T \quad (15)$$

综合式(13) ~ (15), 我们利用 Pauli 基分解将 2×2 的极化散射矩阵 \mathbf{Z} 表示为 3×1 的极化散射矢量 \mathbf{z}_p .

进一步地, 通过对接收信号矢量 \mathbf{z}_p 和某一极化散射矢量基 \mathbf{p} 作内积得到 \mathbf{z}_p 在该方向上的投影, 即

$$\mathbf{z}_p^{(p)} = \mathbf{z}_p \cdot \mathbf{p} \quad (16)$$

矢量 \mathbf{p} 根据 Cloude 在文献[10]中的陈述, 具有如下形式

$$\begin{aligned} \mathbf{p} &= \frac{1}{\sqrt{2}} [p_{\text{HH}} + p_{\text{VV}}, p_{\text{HH}} - p_{\text{VV}}, 2p_{\text{HV}}]^T \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha \exp(j\varphi) \\ \sin \alpha \cos \beta \exp(j\delta) \\ \sin \alpha \sin \beta \exp(j\gamma) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

其中, α 是散射体的内自由度, 取值与目标的散射特性相关, 如图 2 所示, $\alpha \in [0^\circ, 90^\circ]$, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 表示目标的散射机理为各向同性的表面散射; α 增加, 散射机理变为各向异性的表面散射; 当 α 增加到 45° 时, 表示偶极子散射模型; 在 $\alpha = 90^\circ$ 的极限时, 表示二面角散射; β 为目标定向角, 表示散射点在电磁波传播方向法平面上的物理旋转角度; φ, δ 和 γ 分别表示矢量 \mathbf{p} 三个元素的相位.

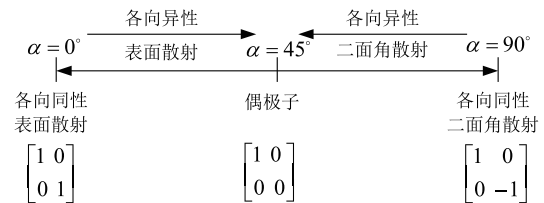


图2 内自由度 α 的物理机理

以时频分布图像的对比度 (Image Contrast) 作为微多普勒时频分布优化的目标函数. 已知图像的信噪比越高, 图像越清晰, 对比度越强, 反之图像的信噪比越低, 图像越模糊, 其对比度也越低.

对于时频图像 $Z(t, f)$, 其图像对比度表达式

如下^[5]

$$I = \frac{\sqrt{E\{|Z(t,f) - E\{Z(t,f)\}\}^2\}}{E\{Z(t,f)\}} \quad (18)$$

这里, $E\{\cdot\}$ 表示取平均操作.

那么, 以符号 $T[\cdot]$ 表示时频变换操作, 又 $I\{\cdot\}$ 为时频图像对比度, 那么存在极化散射矢量 \hat{p} 使得下式满足

$$\hat{p} = \arg \max_p (I\{T[z_p^{(p)}]\}) \quad (19)$$

也就是说 \hat{p} 使得原信号 z 在其上的投影的时频图像对比度最大, 图像最清晰, 信号对噪声和干扰的抑制效果最好.

根据式(19), 利用全极化信息提取目标微多普勒归结为求目标全极化时频图像质量最高对应的最优极化矢量, 基于该矢量获得目标极化散射矩阵在矢量方向上的投影, 进而进行时频变换, 即是全极化条件下的微多普勒估计最优时频图.

综上所述, 对全极化回波信号的时频分布进行优选步骤可概括如下:

步骤 1 录取运动目标的全极化雷达回波;

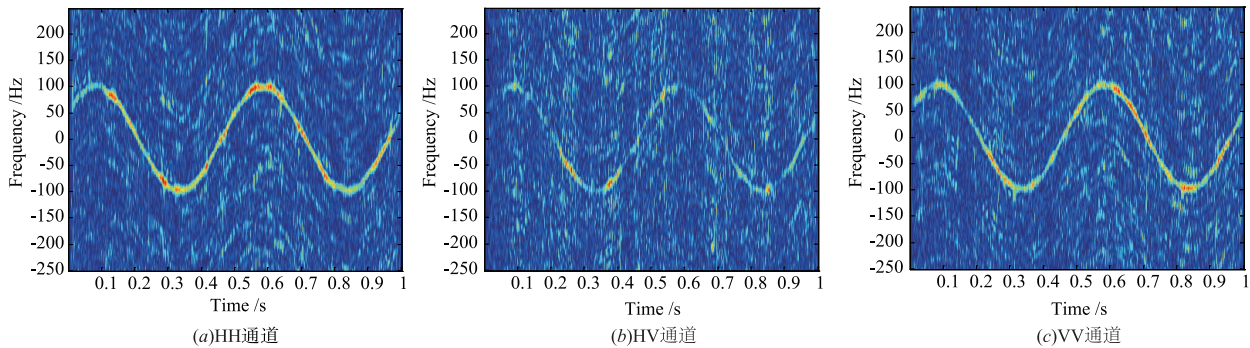


图3 各极化通道时频分布结果

利用全极化微多普勒优化方法对原数据进行优化处理, 得到的最优时频图像如图 4 所示, 对应的最优极化矢量已标明. 对比图 4 和图 3 各极化通道时频分布图可见, 图 4 较图 3(a) ~ (c) 子图均更清晰. 另外, 表 1 给出了图 3 和图 4 对应的图像对比度, 可见图 4 的图像对比度最大, 图像更清晰.

表 1 图 3 和图 4 对应的时频图像对比度

	I
图 3 (a)	0.8459
图 3 (b)	0.8293
图 3 (c)	0.8800
图 4	0.9312

4.2 实测数据分析

利用作者所在课题组开展的空间进动目标暗室测量实验^[11]测得全极化数据对上述理论分析进行验证,

步骤 2 设定初始极化散射矢量 p_0 , 求 z_p 在 p_0 上的投影 $z_p^{(p_0)}$;

步骤 3 对式 $z_p^{(p_0)}$ 进行时频变换得到 $T[z_p^{(p)}]$, 并进一步求时频图像对比度 I ;

步骤 4 重复步骤 1 ~ 步骤 3, 直到得到使 I 最大的极化散射矢量 \hat{p} , 取该极化散射矢量投影上的时频分布为最优时频分布.

4 实验验证

4.1 仿真实验验证

设定式(10)中参数 $k_0 = 100$, $\omega_0 = 4\pi$, $\theta_0 = \frac{\pi}{6}$, 目标

散射矩阵 $S = \begin{bmatrix} 1 & 0.9j \\ 0.9j & -1 \end{bmatrix}$, HH 通道信噪比设置为 0dB, 其他极化通道噪声强度与 HH 通道相同. HH 极化通道、HV 极化通道和 VV 极化通道时频分布结果如图 3(a) ~ (c) 所示. 根据图 3 可见, 由于噪声的影响, 时频面较模糊.

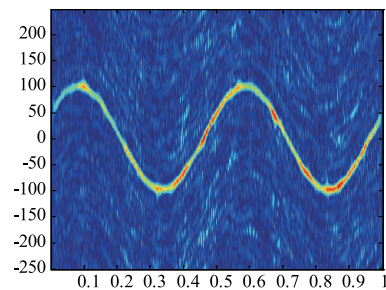


图4 全极化最优时频分布
($\hat{p} = [0.25+0.43j, 0.87+0.75j, 0]$)

实验场景如图 5 所示. 目标体为课题组自主设计开发的目标进动模拟实验平台, 该系统可以动态、独立的模拟目标锥旋和自旋两种微运动, 测量仪器及参数如表 2 所示.

目标体外形如图 6 所示, 其中圆柱底面半径 $a = 0.2\text{m}$, 弹体锥柱结合面距旋转中心的距离 $l_1 = 0.7\text{m}$. 目

标自旋频率设为 3Hz, 进动角 7.9° , 锥旋频率 0.26Hz, 目标与雷达间的平均视线角设为 10.4° .

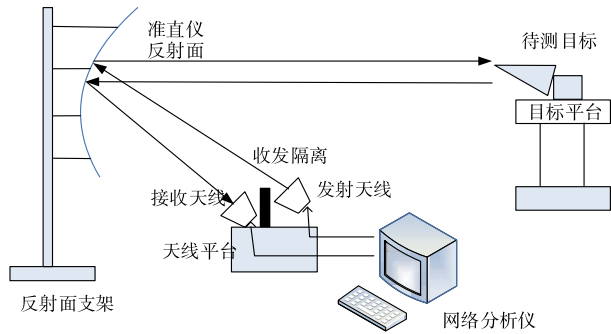
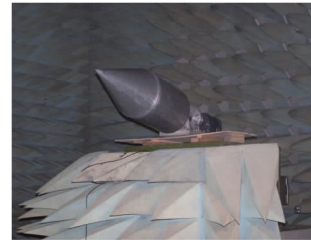


图5 进动目标暗室测量系统示意图

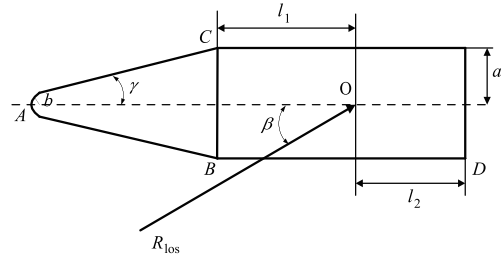
表 2 测量设备及参数

测量设备名称	Agilent 网络分析仪 8362B
测量体制	步进频扫频
扫描频率范围	9GHz ~ 10GHz
扫频间隔	5MHz
距离分辨率	0.15m

由于暗室测量环境噪声和杂波水平较低, 对原始测量数据加上高斯白噪声, 使其 SNR 保持在 0dB 的水平. 取经 DFT 变换后目标 HRRP 对应鼻锥处 (图 6(b) 中散射中心 A) 的全极化回波, 采用时窗为 25 点 Kaiser 窗、频窗为 257 点 Kaiser 窗的平滑伪 Wigner-Ville 分布



(a) 目标体外形



(b) 目标体尺寸

图6 目标体实物外形和几何尺寸

进行时频变换, 如图 7 给出了各极化通道的微多普勒实验结果, 图 8 为采用全极化微多普勒优化算法的时频图. 对比图 7(a) ~ (c) 与图 8 可见, 采用全极化微多普勒提取算法通过最优加权的方式使得时频面的噪声得到抑制, 时频曲线更为清晰, 表 3 对各时频图像对比度的计算结果也印证了这一结果. 更利于后续时频曲线提取和参数估计.

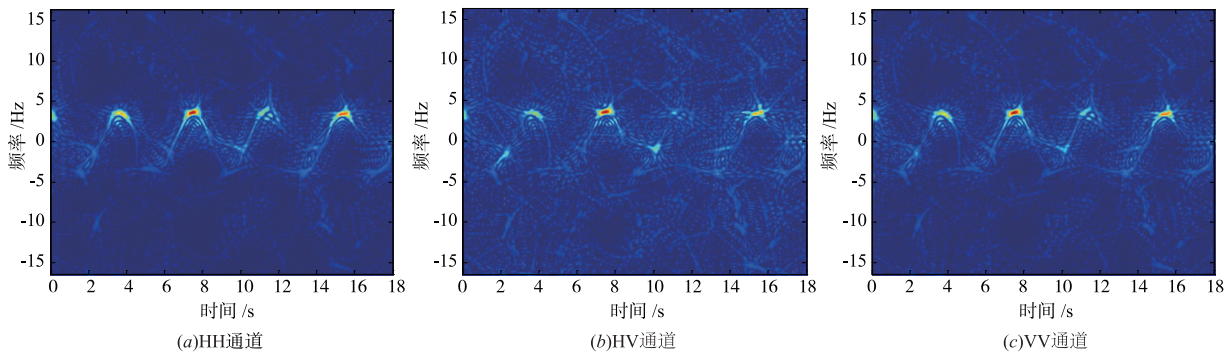


图7 鼻锥单极化通道微多普勒实验结果

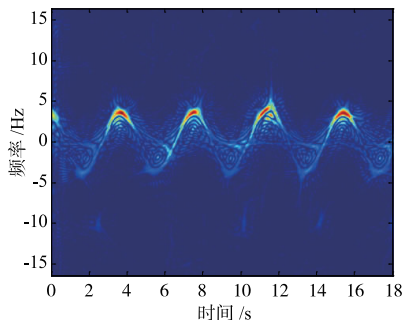


图8 采用全极化微多普勒提取算法的微多普勒时频图 ($\hat{\rho} = [2.29 \ 0.21+0.20j \ 0.23+0.38j]$)

表 3 图 7 和图 8 对应的时频图像对比度

	I
图 7(a)	1.5978
图 7(b)	0.8800
图 7(c)	1.2019
图 8	2.5634

5 结论

为提高微动目标的微多普勒提取质量, 本文首先建立了微动目标全极化回波模型, 提出了基于全极化

信息的微多普勒提取算法,以时频分布图像的对比度为目标函数对时频分布进行优化处理,通过对目标极化优化改善了时频变换的图像质量,利用实测数据验证了该算法的有效性.在后续的研究中将重点对如何快速确定最优矢量展开研究.

参考文献

- [1] 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 & 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] Yang J. On theoretical problems in radar polarimetry [D]. Niigata-shi, Japan: Niigata University, 1999.
- [4] Kostinski A, Boerner W. On the polarimetric contrast optimization [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1987, 35 (8): 988 - 991.
- [5] Martorella, M, Palmer, et al. Polarimetric ISAR autofocusing [J]. IET Signal Processing, 2008, 2 (3): 312 - 324.
- [6] Zhang Y, Amin M G. Polarimetric time-frequency distributions and applications to radar imaging [A]. IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology [C]. Darmstadt, Germany: IEEE, 2004. 310 - 313.
- [7] Tahmouh D, Silvius J. Modeled gait variations in human micro-Doppler [J]. International Journal of Electronics & Telecommunications, 2010, 57 (1): 1 - 4.
- [8] Tahmouh D, Silvius J. Simplified model of dismount micro Doppler and RCS [A]. Radar Conference, 2010 IEEE [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2010. 31 - 34.
- [9] Tahmouh D, Silvius J. Radar polarimetry for security applications [A]. the 7th European Radar Conference [C]. Paris, France: IEEE, 2010. 471 - 474.
- [10] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1998, 36 (5): 1551 - 1565.
- [11] 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 Xuesong, 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)

作者简介



孙 挺 男,1972 年生,汉族,河南沈丘人,博士,现为周口师范学院副教授,主要研究方向为智能信息处理、科学可视化等.

E-mail: suntngcan@tom.com



程 旭 男,1987 年生,汉族,河南固始人,现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生,主要研究方向为统计信号处理,雷达信号处理等.

E-mail: chengxu@nudt.edu.cn