

# 基于 Gabor 变换的微动目标微多普勒分析与仿真

李开明<sup>1</sup>, 李长栋<sup>2</sup>, 李松<sup>3</sup>, 李宏静<sup>4</sup>, 张群<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军航空大学 航空理论系, 吉林 长春 130022; 3. 空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800; 4. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:** 由于目标微动特征信号具有非线性和非平稳的特点, 为有效提取雷达目标的微动特征, 为雷达目标的分类与识别提供依据, 在单频信号体制下, 以旋转散射点目标为例, 基于时频分析的方法提取了旋转目标的微多普勒信息, 通过仿真验证, 得到了微动目标的微多普勒特征, 比较了几种常见时频分析工具的变换结果及性能差异。仿真结果表明, Gabor 变换方法在微动目标微多普勒提取方面是可行而稳健的, Gabor 变换的巨大潜力将为微动目标特征识别提供新的途径。

**关键词:** 微动; 微多普勒; Gabor 变换; 特征识别

**DOI:** 10.3969/j.issn.1009-3516.2010.01.010

**中图分类号:** TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2010)01-0040-04

目标或目标的部件除质心平动以外的旋转等微小运动称为微动(Micro-Motion)<sup>[1]</sup>。目标微动会对回波产生附加的频率调制, 称为微多普勒效应<sup>[1-4]</sup>。微多普勒特征被视为雷达目标具有的独特特征, 对目标的分类、识别与成像具有特殊意义<sup>[2,3]</sup>。目标微动特征信号具有非线性和非平稳的特点, 传统的傅立叶变换缺乏定位功能, 因此, 时频分析为研究复杂运动目标成像与特征提取提供了有效的途径<sup>[4]</sup>。

自 V. C. Chen 提出微多普勒概念以来, 关于微多普勒提取与分离技术的研究迅速发展起来<sup>[1,4-9]</sup>。目前, 基于 Gabor 变换对微动目标微多普勒分析与提取进行研究的还比较少。对非平稳信号的第一类时频表示方法是线性时频表示<sup>[10]</sup>, 典型的有 STFT、小波变换和 Gabor 展开等; 另一种时频表示方法是非线性时频表示, 主要包括 Cohen 类, 其中最重要的是 WVD 以及 PWVD、SPWVD 等。WVD 比其它时频分布表现出更好的时频聚集性, 但对于多分量信号会出现交叉干扰项; 谱图重排能够减小交叉项带来的影响, 但却以降低分辨率为代价, 典型的如 RPWVD、RSPWVD 等。

本文在单频信号体制下, 以旋转目标为例, 运用多种常用的时频工具对目标旋转产生的微多普勒进行仿真, 通过比较验证了 Gabor 变换在微动目标微多普勒分析中的可行性及性能优势, 为下一步研究打下基础。

## 1 Gabor 变换及其数学原理

Gabor 展开通过信号的时间平移和频率调制形式建立非平稳信号的联合时频函数, 然后对时频平面进行采样划分, 将时频平面 $(t, f)$ 转换为两个离散采样网格参数  $m$  和  $n$  的平面, 在二维平面 $(m, n)$ 上表征非平稳信号<sup>[10]</sup>。信号  $s(t)$  的 Gabor 展开定义为:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} g_{mn}(t) \quad (1)$$

式中:  $a_{mn}$  为 Gabor 展开系数;  $g_{mn}(t)$  为 Gabor 基函数, 且:

\* 收稿日期: 2008-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2007F28)

作者简介: 李开明(1982-), 男, 山西应县人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理研究; E-mail: likaiming1982@163.com

张群(1964-), 男, 陕西合阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达成像技术、图像处理、电子对抗研究。

$$g_{mn}(t) = g(t - mT)\exp(j2\pi(nF)t), m, n = 0, \pm 1, \dots \quad (2)$$

Gabor 展开系数可以用下面的 Gabor 变换表示:

$$a_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\gamma_{mn}^*(t)dt \quad (3)$$

式中  $\gamma_{mn}(t)$  是 Gabor 基函数  $g_{mn}(t)$  的对偶函数。实际中,  $g_{mn}(t)$  通常选择高斯窗, Gabor 变换采用过采样(即  $mn < 1$ )。

## 2 目标旋转的微多普勒分析

见图 1, 雷达与目标位于同一 2-D 平面内, 且目标处于远场(即  $R_0 \gg d_0$ )。目标以速度  $v$  沿  $X$  轴正向运动, 散射点  $P(x_0, y_0)$  以角频率  $\Omega$ 、旋转半径  $d_0$  围绕中心点  $Q$  逆时针旋转, 旋转中心  $Q$  到雷达的距离为  $R_0$ ,  $P$  点与雷达射线的初始夹角为  $\theta_0$ , 经过  $t$  时间后到达点  $P_t(x_t, y_t)$ 。由图 1 得:

$$r_p(t) = \sqrt{(R_0 + vt + x_t)^2 + y_t^2} \approx R_0 + vt + x_t + y_t^2/2R_0 \approx R_0 + vt + x_t \quad (4)$$

若单频信号载频为  $f_c$ , 波长为  $\lambda_c$ , 则对基带回波信号相位求导得到散射点的微多普勒为:

$$f_{mD} = -4\pi d_0 \Omega / \lambda_c \sin(\theta_0 + \Omega t) \quad (5)$$

可见目标周期性的旋转产生的微多普勒服从正弦规律的调制。

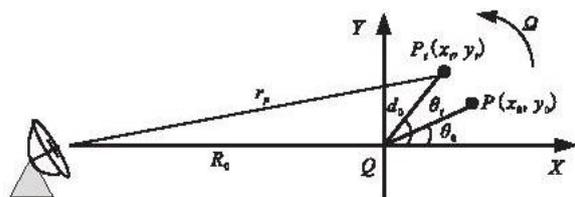


图 1 雷达与旋转目标几何关系图

Fig. 1 Geometry of radar and a rotating target

## 3 仿真验证

图 2 为单点旋转目标模型, 非旋转点到雷达的径向距离为 1 000 m, 旋转点以非旋转点为旋转中心, 作半径为 0.6 m 的旋转运动, 角速度  $\Omega = 30\pi$  rad/s, 载频  $f_c = 1$  GHz,  $P_{RF} = 2 000$ , 设目标平动速度为零。

图 3 为微多普勒的理论值, 图 4、图 5、图 6 分别为采用 Gabor 变换、STFT、WVD 3 种时频分析工具对基带回波信号进行时频分析的结果。仿真中 Gabor 变换选择高斯窗, 且采用过采样条件; STFT 选择汉明窗。可以看出, 时频分析方法可以有效提取目标的微多普勒信息。其中, Gabor 变换和 WVD 都体现出较高的时频分辨率, 明显优于 STFT 变换的结果, 但 WVD 聚焦性能更优。经计算, 旋转目标的旋转周期  $T = 2\pi/\Omega = 0.064$  s, 与仿真结果十分接近。

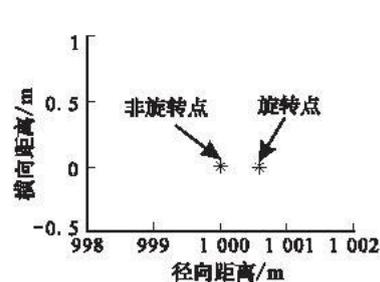


图 2 单点旋转目标模型

Fig. 2 Target model of single rotating point

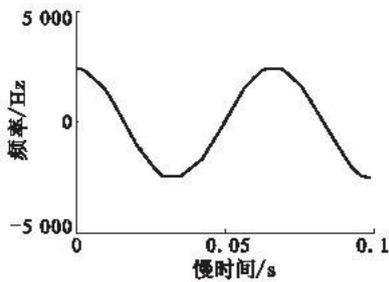


图 3 旋转微多普勒理论值

Fig. 3 Micro-Doppler of Rotation in theory

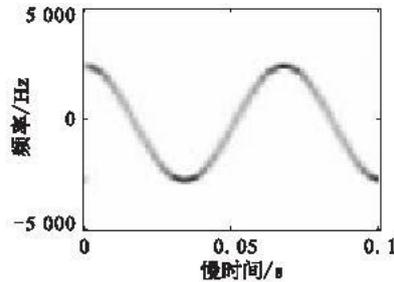


图 4 Gabor 变换结果

Fig. 4 Result of Gabor transformation

当旋转点增加为 2 个时, 仿真参数不变。2 个旋转点分别以 0.6 m 和 0.3 m 的旋转半径和  $20\pi$  rad/s 及  $30\pi$  rad/s 的角速度围绕非旋转点旋转, 初始相位分别为  $\pi/4$  和  $\pi/3$ 。图 7 - 图 12 分别为采用 Gabor 变换、WVD、PWVD、RPWVD、SPWVD、RSPWVD 几种时频工具对基带回波信号进行时频分析的结果。仿真中 PWVD、RPWVD、SPWVD 和 RSPWVD 均选择汉明窗。可见, 当回波中包含多个旋转点的信号分量时, 由于各个正弦调频分量之间的相互影响, WVD、PWVD 和 RPWVD 交叉项较为明显, Gabor 变换可以获得清晰的微多普勒信息, SWVD、RSPWVD 虽然交叉项较小, 但以牺牲分辨率为代价, 其分辨率明显低于 Gabor 变换结果。

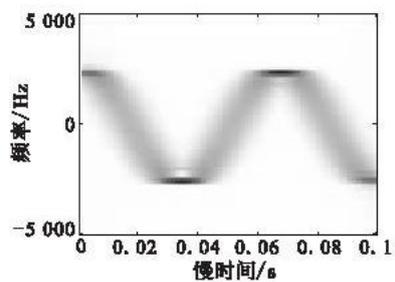


图5 STFT 变换结果

Fig.5 Result of STFT transformation

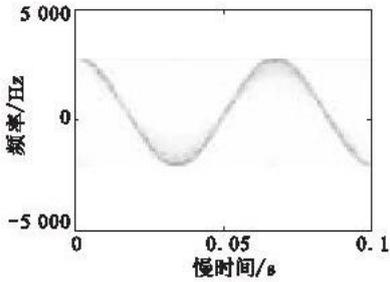


图6 WVD 变换结果

Fig.6 Result of WVD transformation

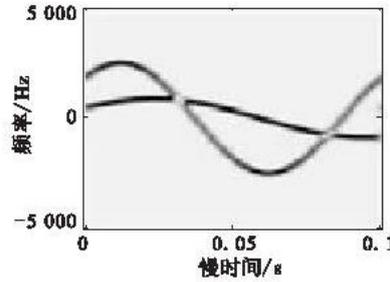


图7 Gabor 变换结果

Fig.7 Result of Gabor transformation

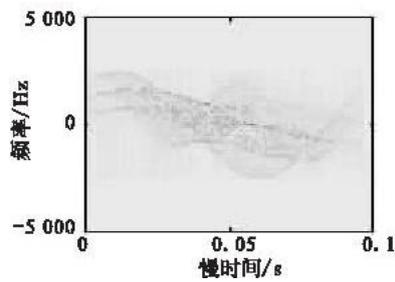


图8 WVD 变换结果

Fig.8 Result of WVD transformation

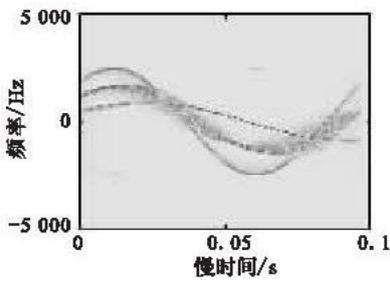


图9 PWVD 变换结果

Fig.9 Result of PWVD transformation

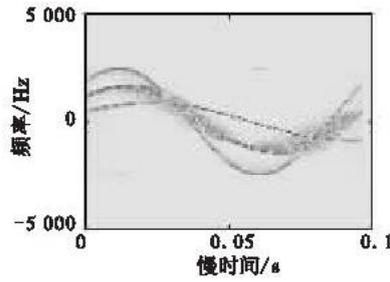


图10 RPWVD 变换结果

Fig.10 Result of RPWVD transformation

当旋转点增加到4个时,由图13-图18可以看出,WVD、PWVD和RPWVD已基本无法识别,SWVD、RSPWVD也出现严重干扰,无法准确提取微多普勒,但Gabor变换依然可得到清晰的目标微多普勒信息。

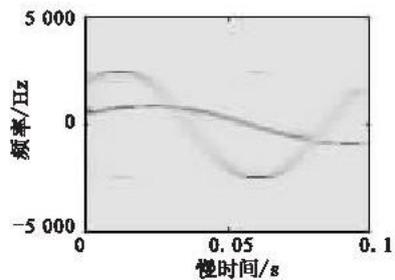


图11 SPWVD 变换结果

Fig.11 Result of SPWVD transformation

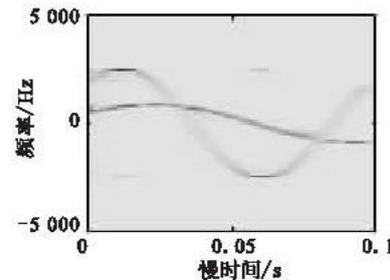


图12 RSPWVD 变换结果

Fig.12 Result of RSPWVD transformation

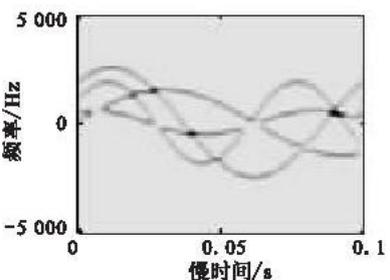


图13 Gabor 变换结果

Fig.13 Result of Gabor transformation

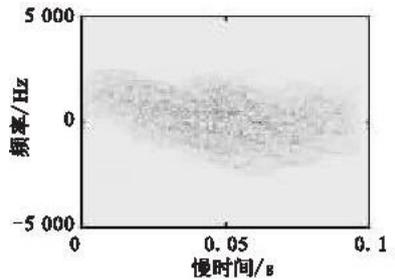


图14 WVD 变换结果

Fig.14 Result of WVD transformation

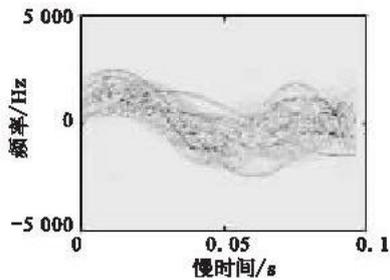


图15 PWVD 变换结果

Fig.15 Result of PWVD transformation

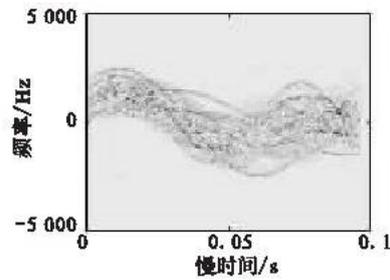


图16 RPWVD 变换结果

Fig.16 Result of SPWVD transformation

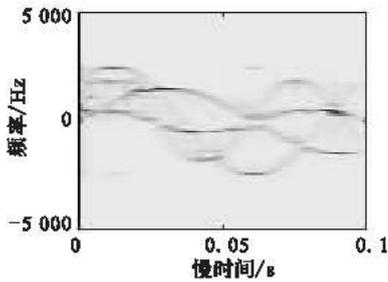


图 17 SWVD 变换结果

Fig. 17 Result of RPWVD transformation

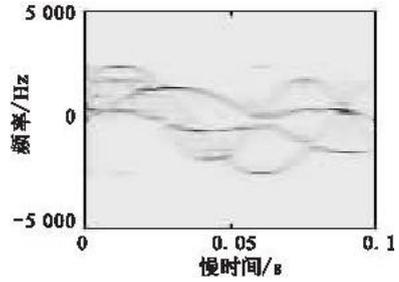


图 18 RSPWVD 变换结果

Fig. 18 Result of RSPWVD transformation

由仿真结果可知:在单频信号下,当点目标较少时,Gabor 变换的聚焦性能优于 STFT;当目标点较多时,非线性时频分布由于交叉项的干扰导致聚焦性能下降,Gabor 变换表现出较好的时频聚焦性能,且受交叉项影响较小。因此,基于 Gabor 变换的方法对微动目标微多普勒信息的提取是实用而稳健的。

## 4 结束语

本文基于时频分析的思想,对单频信号下目标旋转产生的微多普勒进行了分析仿真。可以看出,目标周期性旋转的微多普勒服从正弦规律的调制。通过对几种时频变换结果比较,验证了 Gabor 变换在微多普勒提取方面的可行性及性能优势。因此,基于时频分析特别是基于 Gabor 变换的微动目标特征识别研究潜力巨大;同时,通过时频分析方法得到的微多普勒特征为微动目标识别提供了新的依据。

## 参考文献:

- [1] Chen V C, Li F Y, Ho S S, et al. Micro - doppler Effect in Radar; Phenomenon Model and Simulation Study [J]. IEEE Trans on AES, 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 Zhaowen, LIU Yongxiang, LI Xiang. The Achievements of Target Characteristic of Micro - motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520 - 525. (in Chinese)
- [3] 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 Hangyong, LIU Yongxiang, LI Xiang, et al. Analysis of Micro - doppler and Parameters Estimation [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves Infrared Millim Waves, 2006, 25(5): 360 - 363. (in Chinese)
- [4] Chen V C, Li F, Ho S S, et al. Analysis of Micro - doppler Signatures [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [5] Qun Zhang, Tat Soon Yeo, Hwee Siang Tan, 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.
- [6] Cai C, Liu W, Fu J S, et al. Empirical Mode Decomposition of Micro - doppler Signature [C]//Radar Conference 2005 IEEE International. [S. l]: IEEE Press, 2005: 895 - 899.
- [7] 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.
- [8] 宋美丽, 周亮, 罗迎, 等. 线性调频步进信号雷达目标微多普勒效应[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2009, 10(6): 41 - 45.  
SONG Meili, ZHOU Liang, LUO Ying, et al. Analysis of Micro - doppler Effect in Frequency Stepped Chirp Signal Radar [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(6): 41 - 45. (in Chinese)
- [9] Thayaparan T, Lampropoulos G, Wong S K, et al. Application of Adaptive Joint Time - frequency Algorithm for Focusing Distorted ISAR Images From Simulated and Measured Radar Data [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 213 - 220.
- [10] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.  
HU Guangshu. Digital Signal Processing: Theory Algorithm and Implementation [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1999. (in Chinese)

(编辑:田新华)

(下转第 94 页)