

利用 Gabor-PWVD 变换实现进动目标 微多普勒分析与仿真

罗亚宗¹, 冯有前², 李松¹, 张纳温¹, 岳韶华¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 为了得到微多普勒进动信号更好的时频分析结果, 采用一种基于 Gabor-PWVD 的联合时频分析算法对进动信号进行时频分析。对进动信号进行 Gabor 变换和 PWVD 变换, 得到两个数组, 然后将二者点乘, 当二者都存在信号项时, 就可以得到点乘结果, 而 PWVD 交叉项对应的 Gabor 变换区域却没有值, 点乘结果为零。仿真结果表明: Gabor-PWVD 联合时频分析方法在保证不含交叉项的同时, 得到了聚集性较好的时频分布图。通过 Hough 变换对 Gabor 变换和 Gabor-PWVD 变换的时频图进行周期特征参数提取, 提取值与理论值相比, 误差由 2% 降低为 1.8%, 验证了 Gabor-PWVD 的性能优势。

关键词 进动; 微多普勒; 时频分析; Gabor-PWVD

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.04.011

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)04-0042-04

Micro-Doppler Time-Frequency Analysis and Simulation on Precession Target by Gabor-PWVD Transform

LUO Ya-zong¹, FENG You-qian², LI Song¹, ZHANG Na-wen¹, YUE Shao-hua¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to get better time-frequency analysis results of Micro-Doppler precession signals, this paper tries to analyze precession signals in the aspect of time-frequency through a Gabor-PWVD joint time-frequency analysis. Firstly, the method is used to get two arrays through performing Gabor transform and PWVD transform in precession signals, and make them do point multiplication. When signal items remain in both of them, the point multiplication result can be obtained. If the Gabor transform area in correspondence with the PWVD cross terms area has no value, the result of the point multiplication is zero. The simulation results show that the use of Gabor-PWVD joint time-frequency analysis method can get better time-frequency distribution without containing cross terms and have a good time-frequency clustering at the same time. Compared with the theoretical values, the periodic feature extracted by Hough transform to the Gabor and Gabor-PWVD time-frequency chart shows that the error decreases from 2% to 1.8%, and this verifies that the Gabor-PWVD is superior in performance.

Key words: precession; micro-Doppler; time-frequency analysis; Gabor-PWV

收稿日期: 2013-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372166; 61102109)

作者简介: 罗亚宗(1990-), 男, 湖北潜江人, 硕士生, 主要从事目标微多普勒信息提取研究. E-mail: 418523414@qq.com

引用格式: 罗亚宗, 冯有前, 李松, 等. 基于 Gabor-PWVD 变换的进动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(4): 42-45. LUO Yazong, FENG Youqian, LI Song, et al. Micro-Doppler time-frequency analysis and simulation on precession target by gabor-PWVD transform[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(4): 42-45.

目标微动的部件会对雷达回波产生除多普勒频率之外的频率调制,称为微多普勒效应,相应的信号就是微多普勒信号^[1]。在反导中段,如果弹头重力的作用点与质心重合,重力矩会为零,那么弹头会绕对称轴做自旋运动,如果弹头重力作用点与质心不重合,重力矩不为零,那么弹头在自旋的同时还会绕对称轴以外的轴线做锥旋运动,这就是进动^[2]。进动目标的微多普勒特征被视为弹道目标的独特特征,其时频特性的提取对目标的识别和成像具有重大意义。

目前,国内外在提取窄带信号微多普勒方面,主要采用的方法是时频分析法,典型的有 Gabor 变换和 PWVD(Pseudo WVD, PWVD)分布。Gabor 变换由于不确定性原理的限制,不能同时具有较高的频率和时间分辨率,这是它固有的缺陷。PWVD 分布是对信号的 WVD(Wigner-Ville Distribution, WVD)施加窗函数后做傅里叶变换,由于它是二次型时频分析,所以对多分量信号进行分析时,必不可少的会产生交叉项。文献[3~4]采用了 Gabor 变换和短时傅里叶变换对微多普勒效应进行了时频分析,提取出了不含交叉项的时频图,但时频聚集性都不佳。文献[5~6]采用了 WVD 和平滑伪 Winger-Ville 分布进行时频分析,两者都提取出了清晰的时频分布图,但不同程度的含有交叉项。文献[7]采用了 S 变换进行分析,能抑制交叉项,但效果不佳。文献[8]提出了一种基于 STFT(Short Time Fourier Transform, STFT)的 Winger-Ville 联合时频分析算法,能有效地抑制交叉项。

基于上述研究现状,为了提取出时频聚集性好而且不含交叉项的时频分布图,本文采用一种 Gabor-PWVD 联合时频分布对微多普勒效应进行时频分析。

1 进动目标的微多普勒建模

弹道目标的进动模型见图 1, O 点是雷达坐标系 OUVW 的原点, P₀ 点是参考坐标系 P₀XYZ 的原点, α 和 β 是 P₀ 在 OUVW 坐标系中的方位角和仰角。目标绕锥旋轴 P₀N 做锥旋运动,角速率为 ω_c, O'z 为自旋轴,目标绕 O'z 做自旋运动,角速率为 ω_s。自旋轴与锥旋轴交点为 P₀, P₀ 点在本地坐标系 O'xyz 中的位置矢量 r₀ = (0, 0, z₀), α_N 和 β_N 是锥旋轴在参考坐标系中的方位角和仰角, r_p = (x_p, y_p, z_p) 是尾翼 P 在本地坐标系中的初始位置。

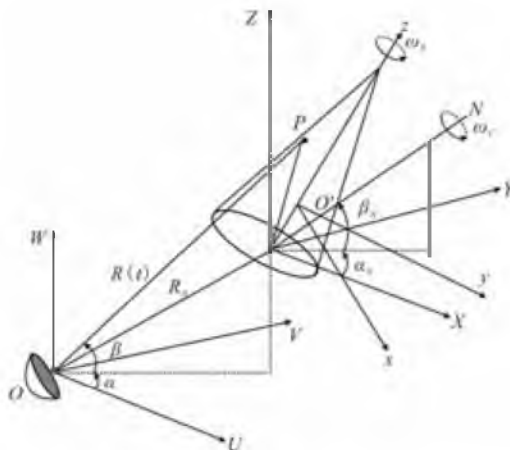


图 1 弹道目标进动模型

Fig.1 Processing model of missile target

将本地坐标系进行 3 次基本旋转后与参考坐标系平行时所需要的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R}_{init} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\theta = \omega_s t$ 。弹道目标在坐标系中的自旋矩阵为:

$$\mathbf{T}_{spining} = \mathbf{I} + \sin(\omega_s t) \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{sz} & -\omega_{sy} \\ \omega_{sz} & 0 & -\omega_{sx} \\ -\omega_{sy} & -\omega_{sx} & 0 \end{bmatrix} + [1 - \cos(\omega_s t)] \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{sz} & -\omega_{sy} \\ \omega_{sz} & 0 & -\omega_{sx} \\ -\omega_{sy} & -\omega_{sx} & 0 \end{bmatrix}^2 \quad (2)$$

式中 $\omega_{sx}, \omega_{sy}, \omega_{sz}$ 为 ω_s 在 P₀XYZ 中坐标值。弹道目标在坐标系 P₀XYZ 中的锥旋矩阵为:

$$\mathbf{T}_{spining} = \mathbf{I} + \sin(\omega_c t) \begin{bmatrix} 0 & -\sin\beta_N & \sin\alpha_N \cos\beta_N \\ \sin\beta_N & 0 & \cos\alpha_N \cos\beta_N \\ -\sin\alpha_N \cos\beta_N & \cos\alpha_N \cos\beta_N & 0 \end{bmatrix} + [1 - \cos(\omega_c t)] \begin{bmatrix} 0 & -\sin\beta_N & \sin\alpha_N \cos\beta_N \\ \sin\beta_N & 0 & -\cos\alpha_N \cos\beta_N \\ -\sin\alpha_N \cos\beta_N & \cos\alpha_N \cos\beta_N & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

弹道目标进动产生的微多普勒频率为^[9-11]:

$$f \frac{1}{\lambda} \frac{d[2\mathbf{T}_{coning} \cdot \mathbf{T}_{spining} \cdot \mathbf{R}_{init} \cdot (\mathbf{r}_p - \mathbf{r}_0)]}{dt} \quad (4)$$

2 Gabor-PWVD 联合时频分析算法

2.1 Gabor 变换原理

Gabor 展开先建立非平稳信号的时频函数,然后通过时频面上采样划分,将时频面 (t, f) 转换成两个离散参数 m 和 n 的平面,最后在二维平面 (m, n) 上表示出非平稳信号^[12]。信号 x(t) 的 Gabor 展开为:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} a_{nm} g_{mn}(t) \quad (5)$$

式中 $g_{mn}(t)$ 称为基函数,表达式为:

$$g_{mn}(t) = g(t - mT) e^{j2\pi(nF)t}, m, n = 0, \pm 1, (6)$$

式中: F 为频率长度; T 为时间长度; a_{mn} 为 Gabor 系数,表达式为:

$$a_{mn} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \gamma_{mn}^*(t) dt \quad (7)$$

式中 $\gamma_{mn}(t)$ 是 $g_{mn}(t)$ 的对偶函数。

2.2 PWVD 原理

信号 $x(t)$ 的 WVD 定义式为:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (8)$$

它表示的是信号的时频能量密度,令 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$, 得到:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} [x_1(t + \frac{\tau}{2}) + x_2(t + \frac{\tau}{2})][x_1^*(t - \frac{\tau}{2}) + x_2^*(t - \frac{\tau}{2})] e^{-j\omega\tau} d\tau = W_{x_1}(t, \omega) + W_{x_2}(t, \omega) + 2\text{Re}[W_{x_1, x_2}(t, \omega)] \quad (9)$$

显然它不再服从线性叠加原理,会产生交叉项,而且信号分量越多,交叉项就越多,这是 WVD 分布的一个重大缺点。因此,为了有效抑制交叉项,可以对 WVD 分布添加窗函数 $h_c(t)$, 然后关于 τ 做傅里叶变换,称为伪 Winger - Ville 分布(PWVD)。即:

$$PW_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau = H(\omega) W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\theta) W_x(t, \omega - \theta) d\theta \quad (10)$$

窗函数的作用是让信号的 WVD 分布在频率上得到平滑,减少交叉项,与此同时也降低了 WVD 分布的频率分辨率。

2.3 Gabor-PWVD 联合时频算法

通过上述分析可知,Gabor 变换和 PWVD 分布均可用于时频分析,但各有优缺点:Gabor 变换不含有交叉项,但时频聚集性不好;PWVD 分布有较好的时频聚集性,但是对多分量信号会产生严重的交叉项。为了克服两者的缺点,可以将二者结合,形成 Gabor-PWVD 联合时频分布。

其融合方法是^[13]:先对信号分别进行 Gabor 变换和 PWVD,得到两个二维数组,然后将数组进行插值使二者维数相等,最后将二者点乘。当二者都存在信号项时,就可以得到点乘结果,而 PWVD 分布交叉项对应的 Gabor 变换区域信号项为 0,点乘

结果为 0。通过这种算法,可以得到时频聚集性好,而且又不含有交叉项的时频分布图。表达式为:

$$P_{\text{Gabor PWVD}} = \text{Gabor}(t, f) \text{PWVD}(t, f) \quad (11)$$

式中 $P_{\text{Gabor PWVD}}$ 为联合分布。

本文先对进动目标的微多普勒信号分别进行 Gabor 变换和 PWVD 变换,其中 Gabor 变换得到了一个 2500×200 的矩阵, PWVD 变换得到了一个 2500×2500 的矩阵,为了使矩阵能进行点乘,本文对 Gabor 变换矩阵采用了双线性插值法,得到了一个 2500×2500 的矩阵,最后将这 2 个矩阵点乘,通过仿真画出时频分布图。

3 仿真分析

设 $\omega_c = 4\pi$ rad/s, 自旋速度 $\omega_s = 10\pi$ rad/s, P_0 在 OUVW 坐标系中初始坐标为 (2 000, 9 000, 8 000), 目标本地坐标系相对于参考坐标系的初始欧拉角为 (45°, 20°, 30°), P_0 在 $O'xyz$ 中的坐标为 (0, 0, -0.5)。 $P_0 N$ 在参考坐标系中的 α_N 和 β_N 分别为 60° 和 45°。信号脉宽为 10^{-8} s, 脉冲重复频率为 5 000 Hz, 载频 $f_c = 6$ GHz, 设目标平动速度为 0。取 4 个特征点 A, B, C, D, 它们在本地坐标系中的初始位置为 (0, 0, -0.5), (0.425, 0, 0.2) 和 (-0.3, -0.4, -0.5)。

图 2 为 4 个点的微多普勒频率理论曲线图,周期参数的理论值为 1 s, 图 3~图 5 分别为采用 Gabor 变换、PWVD 和 Gabor-PWVD 对雷达回波信号进行时频分析的结果。由图可见,图 3 曲线较粗,时频聚集性差,通过 Hough 变换,提取到的周期参数为 0.98 s, 误差为 2%。图 4 有严重的交叉项,使用 Hough 变换无法提取曲线周期参数。图 5 既不含交叉项,而且聚集性又好,采用 Hough 变换提取到的周期参数为 0.981 6 s, 误差为 1.8%, 性能提升明显,验证了 Gabor-PWVD 变换的性能优势。

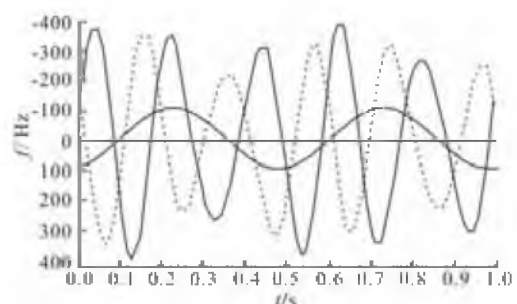


图 2 微多普勒理论值

Fig.2 Micro-Doppler in theory

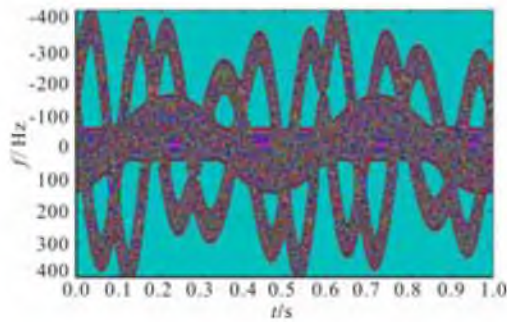


图3 Gabor 变换结果

Fig.3 Result of Gabor transformation

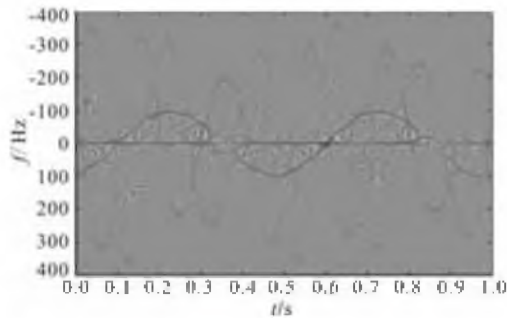


图4 PWVD 变换结果

Fig.4 Result of PWVD transformation

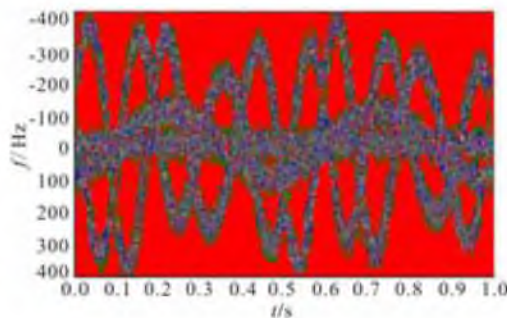


图5 Gabor-PWVD 变换结果

Fig.5 Result of Gabor-PWVD transformation

4 结语

本文分别采用 Gabor 变换、PWVD 和 Gabor-PWVD 对进动目标微多普勒信号进行了时频分析,通过仿真,Gabor-PWVD 得到了时频聚集性好同时又不含交叉项的时频图,然后采用 Hough 变换提取到了更加准确的目标周期参数,为雷达目标的识别与成像提供了依据。

参考文献(References):

- [1] Chen V C, Li F Y, HoI S S. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon model and simulation study [J]. IEEE trans on AES, 2006, 42(1): 12-21.
- [2] 李松. 基于微多普勒效应的弹道目标特征提取及应用[D]. 西安: 空军工程大学, 2013.
- LI Song. Study on feature extraction and application of ballistic target

based on Micro-Doppler effect [D]. Xian: Air force engineering university, 2013. (in Chinese)

- [3] 李开明, 李长栋, 李松, 等. 基于 Gabor 变换的微动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 40-43, 94.
- LI Kaiming, LI Changdong, LI Song, et al. Analysis and simulation for Micro-Doppler information of micro-motion target based on Gabor transformation [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(1): 40-43, 94. (in Chinese)
- [4] 李松, 冯有前, 刘昌云, 等. 弹道导弹微动模型及微多普勒特征研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(6): 37-39.
- LI Song, FENG Youqian, LIU Changyun, et al. Research of micro-motion model and Micro-Doppler of ballistic missile [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(6): 37-39. (in Chinese)
- [5] 伍光新, 王建明, 周伟光, 等. 进动弹头目标微多普勒分析与仿真[J]. 现代雷达学报, 2010, 32(1): 30-34.
- WU Guangxin, WANG Jianming, ZHOU Weiguang, et al. Micro-Doppler analysis and simulation on precession warhead target [J]. Modern radar, 2010, 32(1): 30-34. (in Chinese)
- [6] 程旭, 刘进, 王雪松, 等. 微多普勒特征提取中的时频分布选择[J]. 应用科学学报, 2011, 29(4): 397-404.
- CHENG Xu, LIU Jin, WANG Xuesong, et al. Selection of time-frequency distribution for extraction of Micro-Doppler signatures [J]. Journal of applied science, 2011, 29(4): 397-404. (in Chinese)
- [7] Thayaparan T, Stankovic L, Djurovic I. Micro-Doppler-based target detection and feature extraction in indoor and outdoor environments [J]. Journal of Franklin institute, 2008, 345: 700-722.
- [8] 吕宙. 基于 STFT 的 Wigner-Ville 分布交叉项抑制[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(3): 27-29.
- LÜ Zhou. Cross-terms suppression in wigner-ville distribution based on STFT [J]. Aerospace electronic, 2010, 26(3): 27-29. (in Chinese)
- [9] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE trans on information theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [10] Marivi Tello, Paco López Dekker, Jordi J. Mallorqui a novel strategy for radar imaging based on compressive sensing [C]//IGARSS. Boston, America: IEEE press, 2008: 213-216.
- [11] Mujdat Cetin, Randolph L. Moses. SAR imaging from partial-aperture data with frequency-band omissions [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 58: 32-43.
- [12] 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)
- [13] 彭阳明, 朱培斌, 许肖梅. 一种改进的 Gabor-WVD 联合时频分析算法[J]. 声学技术学报, 2010, 29(6): 420-421.
- PENG Yangming, ZHU PEIbin, XU Xiaomei. An advanced algorithm of Gabor-WVD JTFA [J]. Technical acoustics, 2010, 29(6): 420-421. (in Chinese)

(编辑: 田新华)