

文章编号:1001-9014(2006)05-0360-04

微多普勒分析和参数估计

陈行勇, 刘永祥, 黎湘, 郭桂蓉

(国防科技大学 电子科学与工程学院空间电子信息技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要:首先引入微多普勒率的概念,然后分析了典型微动目标的微多普勒,并利用时-频分布,提取微动目标的微多普勒特征,基于微多普勒,给出了一种估计运动参数的方法,最后对典型微动目标的微多普勒进行了仿真,证明了理论分析的正确性。

关键词:特征提取;微动;微多普勒;时频分布

中图分类号:TN5972.52 **文献标识码:**A

ANALYSIS OF MICRO-DOPPLER AND PARAMETERS ESTIMATION

CHEN Hang-Yong, LIU Yong-Xiang, LI Xiang, GUO Gui-Rong

(Institute of Space Electronics Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The conception of micro-Doppler rate was introduced. Micro-Doppler was investigated for typical targets of micro-motion. Then time-frequency analysis was used to extract micro-Doppler signature, based on which an approach was proposed for estimating motion parameters. A simulation of micro-Doppler was presented for typical targets of micro-motion. The result of emulation validates the theoretical analysis.

Key words: signature extraction; micro-motion; micro-Doppler; time-frequency distribution

引言

目标或目标组成部分的振动或转动会对雷达回波的频谱产生调制,美国海军研究实验室的 Chen Victor C. 将这种现象称为微多普勒效应^[1]. 微多普勒现象首先在相干激光雷达应用中观测到^[2]. Chen Victor C. 认为微波雷达也存在微多普勒现象,研究了雷达振动和转动点目标对单频信号的微多普勒效应的数学原理^[3]. 文献[4]研究了线性调频连续波雷达加速运动目标的加速度与速度估计. 文献[5]研究了线性调频连续波雷达密集动目标参数估计. Lei Jiajin^[6]等人研究了基于时频分布的微多普勒模式识别和基于主成分分析的微多普勒目标分类技术. 新加坡南洋理工大学的 Cai Cheng-jie^[7]等人成功地提取出了静止卡车发动机的微多普勒特征.

目标的振动或转动为高阶运动,对单频连续波的回波为时变频率信号,因此将 Chen Victor C. 的概念推广,可以将目标或目标组成部分在径向相对雷

达的小幅(相对于目标与雷达的径向距离)非匀速运动或运动分量统称为微动,微动对雷达波的调制称为微多普勒现象. 微动在自然界普遍存在,如人的行走时手和腿的运动,飞机的机动,桥梁的振动,电动机的转动,履带车履带的转动,直升机旋翼的转动,弹道导弹弹头的进动和翻滚等. 目标的微多普勒特征反映了目标的电磁特性,几何结构和运动特征,为雷达目标特征抽取和目标识别提供了新的途径.

国内还未见到有关研究微多普勒理论和技术的文献,本文引入微多普勒率的概念,研究利用时频分布提取微多普勒和估计运动参数的方法.

1 微多普勒和运动参数估计

1.1 微多普勒和微多普勒率

微多普勒是微动点目标非匀速运动分量对应的回波信号的瞬时频率. 微动目标回波信号的瞬时频率为时变的,故微多普勒也是时变的,为形成基于微分或差分原理的统一的微动目标参数估计方法,引

收稿日期:2005-11-23,修回日期:2006-05-27

Received date: 2005-11-23, revised date: 2006-05-27

基金项目:国防预研项目(41303040203);国家自然科学基金项目(60402032)

作者简介:陈行勇(1978-),男,江西萍乡人,博士生,主要研究方向为雷达目标识别.

入微多普勒率和高阶微多普勒率概念. 微多普勒率定义为微多普勒对时间的导数, 高阶微多普勒率定义为微多普勒对时间的高阶导数. 由于复杂的微动仅从微多普勒难以分辨, 引入微多普勒率和高阶微多普勒率的概念后, 将低阶微多普勒通过微分降低至一阶或零阶后就可与高阶微多普勒分辨, 从而实现目标微动分辨和多微动目标分辨.

1.2 微动目标参数估计

设雷达发射的信号波形为

$$u(t) = \exp\{j2\pi ft\}, \quad (1)$$

其中, r 为转动分量, 微多普勒率为目标在雷达波束扫描平面内运动, 下面分析典型微动目标的微多普勒和微多普勒率计算.

1.2.1 微机动目标

设目标在雷达径向作变速直线运动, 其径向相对雷达的运动规律为 $R_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i$, 则微多普勒为

$$f_{\text{manD}} = \frac{2fd s_{nu}}{cdt} = \frac{2f}{c} \sum_{i=1}^{n-1} (i+1) a_{i+1} t^i, \quad (2)$$

其中 s_{nu} 为非匀速运动分量, 微多普勒率为微多普勒对时间的导数, 即

$$f_{\text{manD}}^{(1)} = \frac{2f}{c} \sum_{i=0}^{n-2} (i+2)(i+1) a_{i+2} t^i, \quad (3)$$

对于参数, 可由如下算法估计:

$$z_n(t) = z(t)$$

For $k = n:2$

$$\hat{a}_k = \frac{f_{\text{microD}}^{(k-1)}}{k!}$$

$$z_{k-1}(t) = z_k(t) \exp\{-j2\pi f \hat{a}_k t^k\}$$

End

其中 $z(t)$, 为回波信号, $f_{\text{microD}}^{(k-1)}$ 为信号 $z_k(t)$ 的 $k-1$ 阶微多普勒率.

1.2.2 微正弦振动目标

正弦振动是一种典型振动, 点目标在雷达扫描平面内的正弦振动投影到雷达视线方向的运动规律可由振幅 A 和振动频 f_{vib} 率两个参数表征. 设目标在雷达径向有微正弦振动或有微正弦振动分量, 其径向相对雷达的运动规律可表征为 $R_i = R_0 + A \sin(2\pi f_{\text{vib}} t)$, 其微多普勒为

$$f_{\text{vibD}} = \frac{2fd s_{nu}}{cdt} = \frac{4\pi f A f_{\text{vib}} \cos(2\pi f_{\text{vib}} t)}{c}, \quad (4)$$

微多普勒率为

$$f_{\text{vibD}}^{(1)} = -\frac{8\pi^2 f A f_{\text{vib}}^2 \sin(2\pi f_{\text{vib}} t)}{c}, \quad (5)$$

谐振频率可由下式估计

$$\hat{f}_{\text{vib}} = \frac{1 \max_t |f_{\text{vibD}}^{(1)}|}{2\pi \max_t |f_{\text{vibD}}|}, \quad (6)$$

对于匀速微转动点目标, 其径向运动规律同样为正弦函数形式, 其微多普勒和微多普勒率形式与微正弦振动目标相同.

1.2.3 微滚动目标

设点目标在雷达径向作变速直线运动, 同时还有半径为 L , 转速为 ω 的匀速转动, 其运动规律为:

$$R_i = \sum_{i=0}^n a_i t^i + L \sin \omega t, \quad (7)$$

微多普勒为:

$$f_{\text{tumD}} = \frac{2fd(s_{nu} + r)}{cdt} = \frac{2f}{c} \left[\sum_{i=1}^{n-1} (i+1) a_{i+1} t^i + \omega L \cos(\omega t) \right], \quad (8)$$

$$f_{\text{tumD}}^{(1)} = \frac{2f}{c} \left[\sum_{i=0}^{n-2} (i+1)(i+2) a_{i+2} t^i - \omega^2 L \sin(\omega t) \right], \quad (9)$$

转动频率可由下式估计

$$\hat{\omega} = \frac{\max_t |f_{\text{tumD}}^{(n)}|}{\max_t |f_{\text{tumD}}^{(n-1)}|}, \quad (10)$$

其中 $f_{\text{tumD}}^{(n)}$ 为滚动点目标回波信号的 n 阶微多普勒率. 令 $y(t) = z(t) \exp\{-j(\pi f L/c) \sin \omega t\}$, 对于参数 $a_i (i \geq 2)$, 可由如下步骤估计:

$$y_n(t) = y(t)$$

For $k = n:2$

$$\hat{a}_k = \frac{f_{\text{microD}}^{(k-1)}}{k!}$$

$$y_{k-1}(t) = y_k(t) \exp\{-j2\pi f \hat{a}_k t^k\}$$

End

其中 $f_{\text{microD}}^{(k-1)}$ 为信号 $y_k(t)$ 的 $k-1$ 阶微多普勒率.

2 基于时频分布的微多普勒特征抽取

对点目标, 微多普勒特征提取关键在于瞬时频率的计算. 由于微多普勒是随时间变化的, 传统的傅立叶变换不包含时间信息, 不能用于微多普勒的分析. 高分辨的时频分布^[1]是动态信号和多信号分析的一种有效工具.

2.1 Wigner-Ville 分布和瞬时频率

解析信号 $z(t)$ 的 Wigner-Ville 分布为:

$$W(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} z^*(t - \tau) z(t + \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau, \quad (11)$$

设离散信号为 $z(m) (1 \leq m \leq M)$, 信号的瞬时自相

关矩阵 $R_{M \times (2N+1)}$ 为

$$R(m,n) = \begin{cases} z(m+n)z^*(m-n) & n \leq \min\{N, M-m, m-1\} \\ 0 & \text{other} \end{cases}, \quad (12)$$

离散 Wigner-Ville 分布为

$$W(m,k) = FFT_n[R(m,n)], \quad (13)$$

$FFT_n[\cdot]$ 指对 n 的快速傅里叶变换. 单成分信号 $z(t) = \sigma(t) \exp\{j2\pi\phi(t)\}$ 的理想时频分布为一曲面

$$TFD(t,f) = g(\sigma(t))\delta(f - \phi'(t)), \quad (14)$$

$g(\sigma(t))$ 由信号幅度决定, 表征了信号的瞬时能量, 理想时频分布在时频面投影即为瞬时频率曲线, 实际的时频分布由于测不准原理的限制, 不能同时达到时间和频率的聚焦.

2.2 瞬时频率和微多普勒的计算

2.2.1 W-V 分布峰值检测法

Wigner-Ville 分布的峰值在时频面的投影为瞬时频率. 设信号的离散 W-V 分布 $W(m,k)$ 为 $M \times (2N+1)$ 矩阵, 则瞬时频率近似为

$$f(m) = \arg\left\{ \max_{1 \leq k \leq 2N+1} |W(m,k)| \right\} \quad 1 \leq m \leq M, \quad (15)$$

式中 $\arg\{g\}$ 为取宗量运算, 若信号为微动目标对单频连续波的回波, 且由径向匀速平动引起的频移为 f_u , 则微多普勒为

$$f_{microD}(m) = f(m) - f_u \quad 1 \leq m \leq M, \quad (16)$$

微多普勒率为

$$f_{microD}^{(1)}(m) = \frac{f_{microD}(m+1) - f_{microD}(m)}{\Delta t} \quad 1 \leq m \leq M-1, \quad (17)$$

Δt 为采样间隔.

2.2.2 一阶时间条件矩法

信号的瞬时频率为时间的一阶条件矩^[8]

$$\begin{aligned} f(t) &= \langle \omega \rangle_t = \frac{1}{|z(t)|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} fW(t,f)df \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} fW(t,f)df}{\int_{-\infty}^{+\infty} W(t,f)df}, \end{aligned} \quad (18)$$

离散瞬时频率为:

$$f(m) = \frac{\sum_{k=1}^{2N+1} kW(m,k)}{\sum_{k=1}^{2N+1} W(m,k)}, \quad (19)$$

微多普勒和微多普勒率的计算同式(16)、(17)相同.

2.3 仿真计算

设雷达发射信号为单频连续波, 信号频率 $f_0 = 30\text{GHz}$, $t=0$ 时刻目标距离雷达 $R_0 = 20\text{km}$.

2.3.1 微机动目标

设微机动点目标在径向运动规律为 $R(t) = R_0 + 0.1t + 1t^2$, 采样率 $f_s = 10\text{kHz}$, $M = 256$, $N = 128$. 回波信号强度归一化, 图 1 示出了微机动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒估计.

2.3.2 微正弦振动目标

设点目标微正弦振动规律为 $R(t) = R_0 + A\sin 2\pi f_{vib}t$. 采样率 $f_s = 1\text{kHz}$, $M = 256$, $N = 16$, $A = 0.0025\text{m}$, $f_{vib} = 3\text{Hz}$, 回波信号强度归一化, 图 2 示出了微正弦振动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒估计.

2.3.3 微滚动目标

设点目标微滚运动规律为 $R(t) = R_0 + 40t^2 + L\sin 2\pi\omega t$. 采样率 $f_s = 1\text{kHz}$, $M = 256$, $N = 16$, $L = 0.0025\text{m}$, $\omega = 3\text{Hz}$, 回波信号强度归一化, 图 3 示出了微滚动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒估计.

3 结束语

微动点目标的雷达回波是调相的, 目标运动信

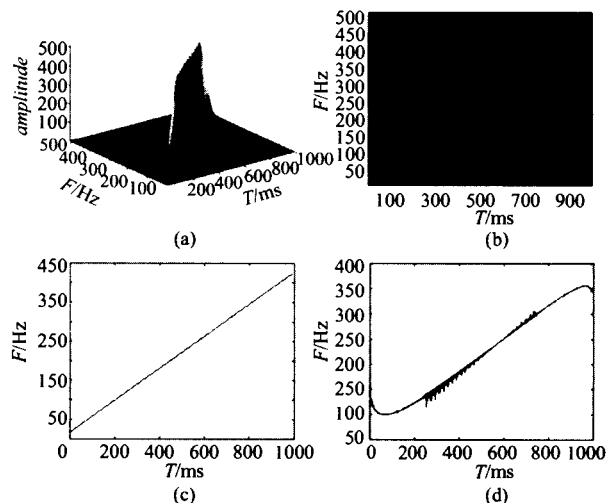


图1 微机动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒 (a) W-V 分布 (b) W-V 分布的投影 (c) 峰值检测法微多普勒估计 (d) 时间一阶条件矩法微多普勒估计 Fig.1 Wigner-Ville distribution and micro-Doppler of the echo signal from an accelerating point-scatterer target (a) Wigner-Ville distribution (b) projection of Wigner-Ville distribution (c) micro-Doppler estimation with peak detection of WVD (d) micro-Doppler estimation with the first moment of WVD

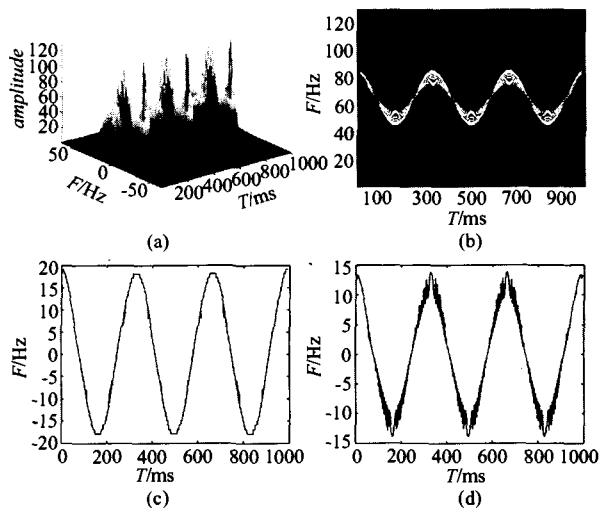


图2 微正弦振动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒 (a) W-V 分布 (b) W-V 分布的投影 (c) 峰值检测法微多普勒估计 (d) 时间一阶条件矩法微多普勒估计

Fig. 2 Wigner-Ville distribution and micro-Doppler of the echo signal from a point-scatterer target with sinusoidal micro-vibration (a) Wigner-Ville distribution (b) projection of Wigner-Ville distribution (c) micro-Doppler estimation with peak detection of WVD (d) micro-Doppler estimation with the first moment of WVD

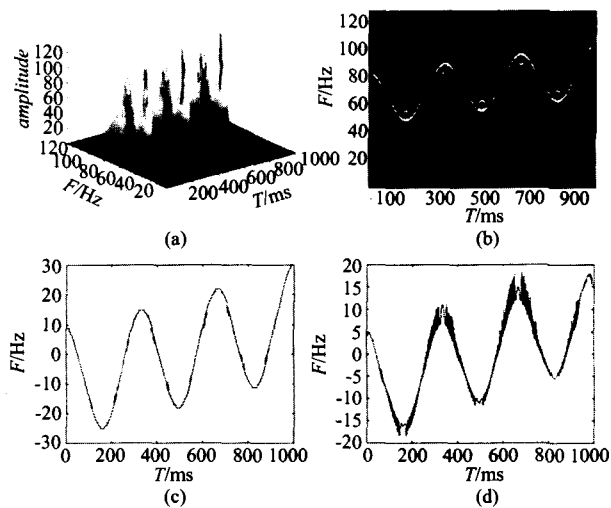


图3 微滚动点目标回波信号的 W-V 分布和微多普勒 (a) W-V 分布 (b) W-V 分布的等高线投影 (c) 峰值检测法微多普勒估计 (d) 时间一阶条件矩法微多普勒估计

Fig. 3 Wigner-Ville distribution and micro-Doppler of the echo signal from a tumbling point-scatterer target (a) Wigner-Ville distribution (b) projection of Wigner-Ville distribution (c) micro-Doppler estimation with peak detection of WVD (d) micro-Doppler estimation with the first moment of WVD

息包含在相位中,微多普勒特征提取可以获得目标运动参数的估计;对复杂目标,其雷达回波是调幅和调相,微多普勒特征提取可以获得目标的运动信息和几何尺寸信息.微波雷达微多普勒现象研究为雷达目标识别提供了一种新思路,国内尚未见研究雷达目标微多普勒特征的文献,此研究方向包括复杂微动目标的雷达特征提取,基于微多普勒的复杂雷达目标成像和微动目标的宽带雷达特征,这些研究方向都是今后研究的重点.

REFERENCES

- [1] Chen V C, Li F Y, Ho S S. Micro-Doppler effect in Radar-phenomenon, model and simulation study[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2—21.
- [2] Lovett A, Shen C, Otaguro W. Microdoppler: non-cooperative target classification/identification[R]. A420040, AD, Maryland, USA: Naval Air Warfare Center Aircraft Division, 2004.
- [3] Chen V C, Li F. Analysis of micro-Doppler signatures[J]. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 271—276.
- [4] Du Yu-Min, Zhang Rong-Quan, Yang Jian-Yu. Detection in Millimeter LFM CW radar target echo and acceleration-velocity estimation[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杜雨铭, 张容权, 杨建宇. 毫米波 LFM CW 雷达加速运动目标回波检测与加速度-速度估计. *红外与毫米波学报*) 2005, 24(5): 348—356.
- [5] Liu Gui-Xi, Ling Wen-Jie. Dense-moving target detection of LFM CW radar[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (刘贵喜, 凌文杰. LFM CW 雷达密集运动目标检测. *红外与毫米波学报*) 2005, 24(1): 76—80.
- [6] Lei J J, Lu C. Target classification based on micro-Doppler signatures[C]. In: Proceedings of International Conference on Radar, Washington, USA, May 2005, 179—183.
- [7] Cai C J, Liu W X, Fu J S. Empirical mode decomposition of micro-Doppler signature[C]. In: Proceedings of International Conference on Radar, Washington, USA, May 2005, 895—899.
- [8] Boashash B. *Time-frequency Signal Analysis and Processing* [M]. Amsterdam: ELSEVIER Ltd., 2003.