

文章编号: 1002-0640(2012) 01-0029-03

OFD-LFM MIMO 雷达中目标部件振动的微多普勒效应分析*

梁贤姣¹, 张群^{1, 2}, 罗迎¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077, 2. 复旦大学波散射与遥感信息国家教育部重点实验室, 上海 200433)

摘要: 与传统单基雷达系统相比, 多输入多输出(MIMO) 雷达系统充分利用发射分集和接收分集的优势, 能够在不同的视角接收目标回波信号, 可以提取目标更精细的微多普勒特征, 因而大大提高了雷达对目标的识别能力。基于MIMO 雷达系统, 详细分析推导了正交频分线性调频信号体制下目标部件振动的微多普勒效应, 并采用时频分析工具对理论分析的结果进行了仿真验证。

关键词: MIMO 雷达, 正交频分, 微多普勒, 时频分析

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Analysis of Micro-doppler Effect Induced by Vibration Parts of Target in OFD-LFM MIMO Radar

LIANG Xian-jiao¹, ZHANG Qun^{1,2}, LUO Ying¹

(1. Institute of Telecommunication Engineering, AFEU, Xi'an 710077, China, 2. Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Compared to traditional monostatic radar system, MIMO (Multiple Input Multiple Output) radar system takes full advantage of both the transmitting diversity and receiving diversity, it can receive returned signals from targets in different aspects with respect to the transmitting/receiving radar pairs. So it can extract more subtle micro-Doppler characteristics about the target and highly improve the target recognition capability of radar. Based on the MIMO radar system with OFD-LFM (Orthogonal Frequency Division Linear Frequency Modulation) signals, the micro-Doppler effect induced by vibration parts of the target is deduced in detail and then simulation experiments are done with time-frequency analysis tools to validate the theoretic conclusions.

Key words: MIMO radar, orthogonal frequency division, micro-Doppler, time-frequency analysis

引言

美国海军研究实验室的Victor C. Chen 将目标或目标的组成部分除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微小运动统称为微动^[1]。微动在自然界普遍存在, 如桥梁的振动, 人行走时手和腿的摆动以及直升机旋翼的转动等。目标自身或目标结构部件的微动会对雷达回波产生附加频率调制, 使目标主体回波频谱存在旁瓣或展宽, 这种现象称为微多普勒效应^[1-2]。微动本质上是一种非匀速运动或非刚体运动, 所以目标微动的特征信号具有非线性和非平

稳的特点^[3], 而时频分析则主要针对非平稳或时变信号, 它着眼于设计时间和频率的联合函数, 用它同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度^[4]。现在时频分析技术广泛用于微多普勒的分析与提取, 它不仅为复杂运动目标的成像及特征提取提供了有效的途径, 而且通过时频分析得到的时频特征为微动目标的识别提供了新的依据^[2]。

由于隐身技术和反隐身技术在现代电子战中扮演着越来越重要的角色, 单个雷达工作已经无法满足应用需求, 多输入多输出(MIMO, Multiple Input Multiple Output) 雷达^[5-6]应运而生。MIMO 雷达提出后引起了相关研究人员的广泛关注, 目前对MIMO 雷达的研究主要集中在信号设计、检测、波束形成等方面^[7-9], 关于MIMO 雷达系统的微多普勒效应研究尚未见公开报道。

收稿日期: 2010-09-19 修回日期: 2010-12-25

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100)

作者简介: 梁贤姣(1986-), 女, 湖南涟源人, 硕士研究生

1 振动的微多普勒效应分析

假设含振动散射点的目标和MIMO雷达处于一个2-D平面上,如图1所示。 M 个发射雷达和 N 个接收雷达均位于 X 轴上,横坐标分别为 $(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rM})$ 、 $(x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rN})$ 。目标以速度 v 沿 X 轴正向匀速运动,其上某个振动散射点 Q 绕初始时刻坐标为 (x_o, y_o) 的目标中心点 O 振动,其振幅、振动频率、初始相位分别 r 、 ω 、 φ ;振动方向与 X 轴夹角为常数 γ 。若记 D_{t_m} 为慢时间 t_m 时刻点 Q 到目标中心点 O 之间的距离,则有 $D_{t_m} = r \cdot \sin(\omega t_m + \varphi)$ 。

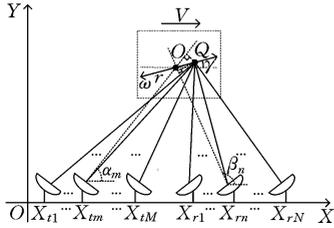


图1 MIMO雷达与含振动散射点目标的几何关系图

良好的信号正交性是MIMO雷达实现的关键,因此各个发射阵元辐射的波形需要精心设计,而正交频分线性调频信号是一种良好的正交波形^[10]。在OFD-LFM MIMO系统中,第 m 个发射雷达辐射的信号为

$$s_m(t) = \text{rect}\left[\frac{t}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}\mu t^2 + \frac{m-1}{T_p}t\right)\right], \quad m = 1, \dots, M \tag{1}$$

其中当 $-1/2 \leq t \leq 1/2$ 时, $\text{rect}(t) = 1$, t 为快时间, T_p 为脉冲宽度, f_0 为起始载频, μ 为调频斜率, M 为MIMO雷达系统中的发射雷达总数。

当采用“走-停”模式时,若第 m 个发射雷达辐射信号 $S_m(t)$,则在慢时间 t_m 时刻第 n 个接收雷达收到的经过振动散射点 Q 反射的回波信号为

$$s_n(t, t_m) = \sigma(m, n) \cdot s_m\left[t - \frac{R(t_m; m, n)}{c}\right], \quad n = 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

其中 $\sigma(m, n)$ 为采用发射雷达 m 及接收雷达 n 时振动散射点 Q 的反射系数, $R(t_m; m, n) = R_m(t_m; m) + R_n(t_m; n)$, $R_m(t_m; m)$ 、 $R_n(t_m; n)$ 分别是振动散射点 Q 在 t_m 时刻到发射雷达 m 和接收雷达 n 的距离, c 为光速。

假设可准确估计出目标中心点 O 的运动轨迹,取 O 点为参考点得到参考信号

$$s_o(t, t_m) = \text{rect}\left[\frac{t - R_o(t_m; m, n)/c}{T_{ref}}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi \cdot f_0 \left[t - \frac{R_o(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi \cdot \frac{1}{2}\mu \left[t - \frac{R_o(t_m; m, n)}{c}\right]^2\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi \cdot \frac{m-1}{T_p} \left[t - \frac{R_o(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \tag{3}$$

其中 $R_o(t_m; m, n) = R_{mo}(t_m; m) + R_{no}(t_m; n)$, $R_{mo}(t_m; m)$ 、 $R_{no}(t_m; n)$ 分别是目标中心点 O 在 t_m 时刻到发射雷达 m 和接收雷达 n 的距离, T_{ref} 是参考信号的持续时间,比 T_p 略大一些。将式(2)与式(3)共轭相乘,得到

$$s_d(t, t_m) = s_n(t, t_m) \cdot s_o^*(t, t_m) = \sigma(m, n) \cdot \text{rect}\left[\frac{t - R(t_m; m, n)/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi\left[f_0 + \frac{m-1}{T_p}\right] \cdot \left[\frac{R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\mu \frac{R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n)}{c} \cdot t\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi \cdot \frac{\mu}{2c^2}(R^2(t_m; m, n) - R_o^2(t_m; m, n))\right\} \tag{4}$$

对式(4)进行关于快时间 t 的傅立叶变换并整理得

$$S_d(f, t_m) = \sigma(m, n) \cdot T_p \cdot \exp\left\{-j2\pi\left[f_0 + \frac{m-1}{T_p}\right] \cdot \left[\frac{R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi \cdot \frac{\mu}{2c^2}(R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n))^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi f \frac{R(t_m; m, n)}{c}\right\} \cdot \text{sinc}\left[T_p \left(f + \mu \frac{R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n)}{c}\right)\right] \tag{5}$$

由式(5)可以看出, $S_d(f, t_m)$ 是一个sinc函数,其峰值出现在 $f = -\mu(R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n))/c$ 处。

在MIMO雷达系统中,目标的尺寸通常远小于目标到各收发雷达间的距离。因此振动散射点 Q 在 t_m 时刻到发射雷达 m 之间的距离 $R_m(t_m; m)$ 可近似等于 t_m 时刻 $R_m(t_m; m)$ 在第 m 个发射雷达和目标中心点 O 连线上的投影值,同理得到 $R_n(t_m; n)$ 的近似。在 t_m 时刻分别记第 m 个发射雷达、第 n 个接收雷达和目标中心点 O 连线与 X 轴的夹角为 α_m 、 β_n ,如图1虚线所示,满足 $\tan\alpha_m = y_o/(x_o - x_{tm})$, $\tan\beta_n = y_o/(x_o - x_{tn})$ 。经近似计算后得

$$R_m(t_m; m) \approx R_{mo}(t_m; m) + r \cdot \sin(\omega \cdot t_m + \varphi) \cdot \cos(\alpha_m - \gamma) \tag{6}$$

$$R_n(t_m; n) \approx R_{no}(t_m; n) + r \cdot \sin(\omega \cdot t_m + \varphi) \cdot \cos(\beta_n - \gamma) \tag{7}$$

则

$$R(t_m; m, n) - R_o(t_m; m, n) = r \cdot [\cos(\alpha_m - \gamma) + \cos(\beta_n - \gamma)] \cdot \sin(\omega \cdot t_m + \varphi) \tag{8}$$

从式(8)可得距离差值随慢时间作正弦形式的变化,因此振动引入的微多普勒效应在距离-慢时间平面上将对应幅值为 $r \cdot [\cos(\alpha_m - \gamma) + \cos(\beta_n - \gamma)]$ 、初始相位为 φ 、频率为 ω 的正弦曲线。由于参数

α_m, β_n 的取值与选取的观测雷达组合有关,因此不同的收发雷达组合得到微多普勒曲线的幅值不同。

2 时频变换理论

微多普勒频率随时间发生变化,而联合时频变换正是为了描述信号的时变频率分量发展起来的^[1],常见的分析微多普勒信息的时频工具有:短时傅立叶变换、WVD 分布及其改进分布类、Gabor 变换、小波变换等。下面主要介绍短时傅立叶变换、WVD 分布及 Gabor 变换的基本理论^[4,11]。

短时傅立叶变换(STFT)比较经典,信号 $x(t)$ 的STFT 定义为

$$\text{STFT}_x(t, \omega) = \int x(\tau) g^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (9)$$

式中窗函数 $g(\tau)$ 应取对称的实函数。短时傅立叶变换又称为加窗傅立叶变换,通过移动时间窗来分析信号的频率分量,从而得到包含信号在不同时间的频率信息的谱图。由于窗函数的原因,STFT 的分辨率会受到限制。时间窗越短,得到的时间分辨率越好,但是频率分辨率会降低,反之亦然。

Wigner 分布的概念是由Wigner 在1932年提出并应用在量子力学领域。1948年Ville 将其用于信号分析,因此称为Wigner-Ville 分布(简记为WVD)。信号 $x(t)$ 的WVD 分布定义为

$$\text{WVD}_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (10)$$

虽然WVD 有非常好的时频聚焦性,但当信号在联合时频平面包含多个分量时,它的WVD 将在每两个独立分量间产生交叉项,交叉项的干扰严重影响了WVD 在信号检测方面的有用性。

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间-频率函数,然后对时间-频率平面进行采样划分,将时频平面 (t, f) 转换成另外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,也就是说Gabor 变换的思想是利用二维时频平面上离散栅格上的点来表示一个一维信号。连续信号 $x(t)$ 的Gabor 展开定义为

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_{m,n} h_{m,n}(t) \quad (11)$$

其中 $C_{m,n}$ 称作一维信号 $x(t)$ 的Gabor 展开系数,而 $h_{m,n}(t)$ 称为Gabor 基函数,由母函数 $h(t)$ 作移位和调制所生成,即

$$h_{m,n}(t) = h(t - na) e^{j2\pi m t} \quad (12)$$

其中 $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, a, b$ 为常数, a, b 代表栅格的时间长度, b 代表栅格的频率长度。一般选用高斯函数作为Gabor 展开的基函数 $n(t)$,能保证时

域与频域的能量都较为集中,从而得到最好的时间及频率分辨率。

3 仿真实验

设MIMO 雷达系统包含位于 X 轴上的3个发射雷达和9个接收雷达。发射雷达和接收雷达的横坐标分别为 $(-5000, -3000, -1000), (2000, 3600, 5300, 7000, 8200, 10000, 12000, 14000, 16000)$,单位为m。发射雷达辐射的OFD-LFM 信号脉宽 $T_p = 1 \mu\text{s}$,起始载频10 GHz,带宽均为600 MHz,脉冲重复频率为2000 Hz,回波信号时长1 s。目标沿 X 轴正向运动速度 $v = 300 \text{ m/s}$,中心点 O 在初始时刻坐标为 $(4500, 6000)$,散射点 Q 的振幅、振动频率及初始相位分别为0.1 m、5 Hz、 $\pi/5 \text{ rad}$,振动方向与 X 轴夹角为 $\pi/4 \text{ rad}$ 。

将选取第 m 个发射雷达和第 n 个接收雷达记为选取收发雷达 (m, n) 。任意选定收发雷达 $(2, 8)$,采用傅立叶变换得到的距离-慢时间谱图见图2,而采用短时傅立叶变换、WVD 和Gabor 变换进行时频分析的结果分别见图3~图5。

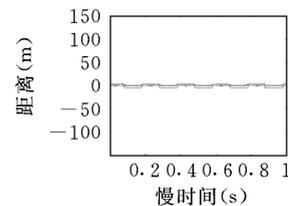


图2 傅立叶变换图

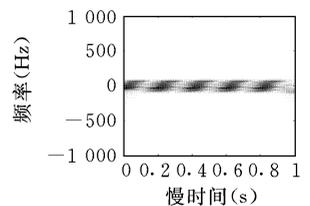


图3 STFT 曲线图

分析图2~图5,采用傅立叶变换得到的谱图观察不到振动的微多普勒曲线,采用STFT 和WVD 得到的时频分析结果也体现不出微多普勒曲线,而Gabor 变换却得到了较为清晰的正弦曲线,所得正弦曲线的周期约为0.2 s,与设定的振动频率5 Hz相吻合。

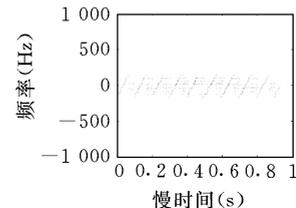


图4 WVD 分布图

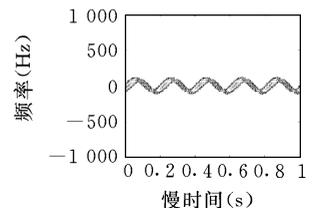


图5 Gabor 变换图

下面采用Gabor 变换来观察不同收发雷达组合下振动的微多普勒效应。任选几组收发雷达,如 $(3, 1), (1, 9), (2, 1), (3, 6)$,采用Gabor 变换得到的结果如图6所示。选取的收发雷达组合不同,得到的正弦曲线的幅值不同,但峰值出现的时刻相同,这说明它们具有相同的初始相位,与理论分析结果一致。

(下转第35页)

联合估计的方法已经能够检测目标信号。

4 结束语

利用矢量空间的最小二乘算法, 能够有效地抑制目标通道中的直达波信号^[7]。需要指出的是该算法不但能够抑制直达波, 而且对多路径信号及特定距离单元与特定多普勒频移的目标也能够起到抑制作用。如果在目标通道中有多个运动目标, 高信噪比的目标会影响低信噪比目标的检测, 在联合估计时首先估计高信噪比的目标参数, 在正确设置该算法中的 K 和 P 参数的前提下, 可抑制此高信噪比的目标, 从而能够完成对低信噪比的目标检测^[8]。

参考文献:

- [1] Howland P E, Maksimiuk D, Reitsma G. FM Radio Based Bistatic Radar [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2005, 152(3): 107-115.
- [2] Howland P E. FM-Radio Based Bistatic Radar [C]//AOC 4th Multinational PCR Conference, Syracuse,

NY, 2005.

- [3] 龚耀寰. 自适应滤波(第二版)-时域自适应滤波和智能天线[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] Colone F, Hagan D W O, Lombardo P. A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 698-703.
- [5] Simon H, 郑宝玉. 自适应滤波器原理(第四版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] Tao R, Zhang W Q, Chen E Q. Two-stage Method for Joint Time Delay and Doppler Shift Estimation [J]. IET Radar Sonar Navig., 2008, 2(1): 71-77.
- [7] Colone F, Cardinali R, Lombardo P. Space-time Constant Modulus Algorithm for Multipath Removal on the Reference Signal Exploited by Passive Bistatic Radar [J]. IET Radar Sonar Navig., 2009, 3(3): 253-264.
- [8] 刘志强, 马红光, 杨利峰. 强干扰下无源雷达弱目标探测[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(6): 782-787.

(上接第 31 页)

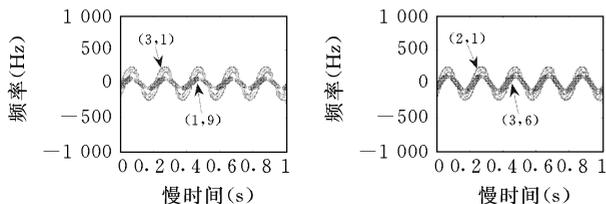


图 6 不同收发雷达组合得到的 Gabor 变换结果

4 结束语

MIMO 雷达系统利用空间分集技术, 能从不同的视角接收目标回波信号, 可提取更丰富的目标特征信息。本文建立了 OFD-LFM MIMO 雷达系统中振动的微多普勒数学模型, 为基于微多普勒效应的 MIMO 雷达目标识别提供了理论依据。

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] Chen V C. Analysis of Radar Micro-Doppler Signature with Time-Frequency Transform [C]//Proc. of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing, Pocono Manor, PA, USA: IEEE Press, 2000: 463-466.
- [3] 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): 520-523.

- [4] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [5] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO Radar: An Idea Whose Time Has Come [C]//Proc. of 2004 IEEE Radar Conference, Philadelphia, PA, USA: IEEE Press, 2004: 71-78.
- [6] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. Performance of MIMO Radar Systems: Advantages of Angular Diversity [C]//Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers Pacific Grove, CA, USA: IEEE Press, 2004: 305-309.
- [7] 何子述, 韩春林, 刘波. MIMO 雷达概念及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2441-2445.
- [8] 戴喜增, 彭应宁, 汤俊. MIMO 雷达检测性能 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(1): 88-91.
- [9] 赵瑞丽, 刘峥. 一种基于信道估计的 MIMO 雷达空时信号设计方法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(9): 2065-2068.
- [10] 刘波, 韩春林, 苗江宏. MIMO 雷达正交频分 LFM 信号设计及性能分析 [J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(1): 28-31.
- [11] Victor C C, Hao L. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. 北京: 海洋出版社, 2008.