

基于 OFD-LFM 信号的 MIMO 雷达微多普勒效应分析*

梁贤姣¹, 张群^{1,2}, 罗迎¹, 叶蔚³

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 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;
3. 中国人民解放军 94270 部队, 山东 济南 250017)

摘要: 多输入多输出(MIMO)雷达系统利用空间分集技术,能够在不同视角接收目标回波信号,与传统单基雷达系统相比,可以提取更丰富的目标特征信息,因而大大提高了雷达的目标运动参数估计精度。基于MIMO雷达系统,详细推导了正交频分线性调频信号体制下目标部件旋转引入的微多普勒效应,通过取多组观测数据的数学期望对旋转半径进行了参数估计,最后的仿真实验验证了理论分析的结果,得到的旋转半径估值与真实值非常接近。

关键词: MIMO 雷达; 正交频分; 微多普勒; 参数估计

doi: 10.3969/j.issn.1009-086x.2011.02.024

中图分类号: TN957; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2011)02-0118-05

MIMO Radar Micro Doppler Effect Analysis Based on OFD-LFM Signal

LIANG Xian jiao¹, ZHANG Qun^{1, 2}, LUO Ying¹, YE Wei³

(1. AFEU, Institute of Telecommunication Engineering, Shaanxi Xi'an 710077, China;

2. Fudan University, Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information (Ministry of Education), Shanghai 200433, China; 3. PLA, No. 94270 Troop, Shandong Jinan 250017, China)

Abstract: Compared with traditional monostatic radar system, multiple input multiple output(MIMO) radar system can receive returned signals from targets in different aspects with respect to the transmitting/receiving radar pairs by utilizing the spatial diversity technology and can obtain more target information, which highly improves the radar's estimation accuracy of target moving parameters. Based on the MIMO radar system with orthogonal frequency division linear frequency modulation (OFD-LFM) signals, the micro Doppler effect caused by rotating parts of the target is deduced in detail and then the rotation radius is estimated by calculating the mathematical expectation of the obtained data. Simulations are given to validate the theoretic conclusions and prove that the estimated rotation radius obtained in is very close to its real value.

Key words: multiple input multiple output(MIMO) radar; orthogonal frequency division; micro-Doppler; parameter estimation

* 收稿日期: 2010-11-18; 修回日期: 2010-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60971100)

作者简介: 梁贤姣(1986-), 女, 湖南涟源人。硕士生, 主要研究方向为多输入多输出雷达成像及目标识别。

通信地址: 710077 陕西省西安市沣镐东路1号研管14队 E-mail: drdd111586@163.com

0 引言

一个物体或者是物体上的任何一个部件的微小运动都可能对雷达回波信号产生附加的频率调制, 使目标主体的回波频谱存在旁瓣或展宽, 生成多普勒边带, 这种现象称为微多普勒效应(micro Doppler effect)^[1-2]。微多普勒效应是目标结构部件与主体之间相互作用的结果, 能够反映目标对电磁散射的综合调制特征以及目标的几何结构和运动特征, 因此通过分析微多普勒信息, 可以得到更多关于目标及其结构部件的振动频率、幅度等独一无二的信息, 为雷达目标的探测、特征提取和识别提供了新的途径^[2-6]。

在现代电子战中, 隐身技术和反隐身技术扮演着越来越重要的角色, 单个雷达工作已经不能满足应用需求, 2004 年 Eran Fishler 提出了多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)雷达概念^[7-8]。MIMO 雷达系统充分利用了系统的空间分集增益, 可以形成多个收发通道, 能够在不同的视角接收目标回波信号, 因此能提取目标更多更精细的微多普勒特征, 从而提高雷达在目标运动参数估计、弱目标检测等方面的性能^[9-10]。

本文基于正交频分线性调频(OFD-LFM) MIMO 雷达系统, 对目标部件旋转引入的微多普勒效应进行了详细推导, 由于 MIMO 雷达具有“多发多收”的工作模式, 可以形成多个收发通道从而获取多组观测数据, 因此采用对多组观测数据取数学期望的方法对旋转半径进行了估计, 最后对理论分析的结果进行了仿真验证。

1 旋转目标的微多普勒效应分析

良好的信号正交性是 MIMO 雷达实现的关键, 线性调频信号是雷达成像中常用的宽带信号形式, 而正交频分线性调频信号则是一种良好的正交波形^[11], 本文便采用 OFD-LFM 信号来分析 MIMO 雷达系统中由目标部件旋转引入的微多普勒效应。

假设含旋转散射点的目标和 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 $(x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tM}), (x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rN})$ 。目标以速度 v 沿 x 轴正向匀速运动, 目标上某个旋转散射点 P 绕初始

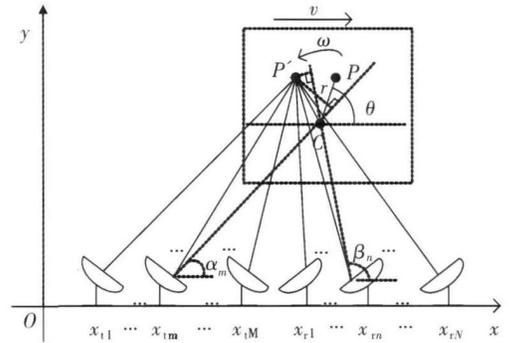


图 1 MIMO 雷达与含旋转散射点目标的几何关系图

Fig.1 Geometry of MIMO radar and target with rotating parts

时刻坐标为 (x_c, y_c) 的目标中心点 C 旋转, 其旋转半径、旋转频率及初始相位分别 r, ω, θ 。

在正交频分线性调频信号体制下, 第 m 个发射雷达辐射的信号为

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

$$m = 1, \dots, M. \quad (1)$$

式中: t 为快时间; T_p 为脉冲宽度; f_c 为起始载频; μ 为调频斜率; M 为发射雷达总数。

采用“走-停”模式时, 若第 m 个发射雷达幅射信号 $s_m(t)$, 则在慢时间 t_m 时刻第 n 个接收雷达收到的经过旋转散射点 P 反射的回波信号为

$$s_n(t, t_m) = \sigma(m, n) s_m\left[t - \frac{R(t_m; m, n)}{c}\right],$$

$$n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

式中: $\sigma(m, n)$ 为选取发射雷达 m 及接收雷达 n 时旋转散射点 P 的反射系数; $R(t_m; m, n) = R_m(t_m; m) + R_n(t_m; n)$, $R_m(t_m; m)$, $R_n(t_m; n)$ 分别为旋转散射点 P 在 t_m 时刻到发射雷达 m 和接收雷达 n 的距离; c 为光速。

为便于分析, 假设目标与雷达之间的相对平动被精确补偿, 即可准确估计出目标中心点 C 的运动轨迹, 那么取 C 点为参考点, 则参考信号为

$$s_r(t, t_m) = \text{rect}\left[\frac{t - R_c(t_m; m, n)/c}{T_{\text{ref}}}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi\mathcal{F}_c\left[t - \frac{R_c(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{j2\pi \cdot \frac{1}{2}\mu\left[t - \frac{R_c(t_m; m, n)}{c}\right]^2\right\}.$$

$$\exp\left\{j2\pi\frac{m-1}{T_p}\left[t-\frac{R_c(t_m; m, n)}{c}\right]\right\}, \quad (3)$$

式中: $R_c(t_m; m, n) = R_{mc}(t_m; m) + R_{nc}(t_m; n)$, $R_{mc}(t_m; m)$, $R_{nc}(t_m; n)$ 分别为目标中心点 C 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, 即进行“dechirp”处理, 得到:

$$\begin{aligned} s_c(t, t_m) &= s_n(t, t_m) s_r^*(t, t_m) = \\ & o(m, n) \operatorname{rect}\left[\frac{t-R(t_m; m, n)/c}{T_p}\right] \cdot \\ & \exp\left\{-j2\pi\left[f_c+\frac{m-1}{T_p}\right]\left[\frac{R(t_m; m, n)-R_c(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \\ & \exp\left[-j2\pi\mu\frac{R(t_m; m, n)-R_c(t_m; m, n)}{c}t\right] \cdot \\ & \exp\left\{j2\pi\frac{\mu}{2c^2}\left[R^2(t_m; m, n)-R_c^2(t_m; m, n)\right]\right\}, \quad (4) \end{aligned}$$

对式(4)进行关于快时间 t 的傅里叶变换并整理得

$$\begin{aligned} S_c(f, t_m) &= o(m, n) T_p \cdot \\ & \exp\left\{-j2\pi\left[f_c+\frac{m-1}{T_p}\right]\left[\frac{R(t_m; m, n)-R_c(t_m; m, n)}{c}\right]\right\} \cdot \\ & \exp\left\{-j2\pi\frac{\mu}{2c^2}\left[R(t_m; m, n)-R_c(t_m; m, n)\right]^2\right\} \cdot \\ & \exp\left[-j2\pi f\frac{R(t_m; m, n)}{c}\right] \operatorname{sinc}\left\{T_p\left[f+\right.\right. \\ & \left.\left.\mu\frac{R(t_m; m, n)-R_c(t_m; m, n)}{c}\right]\right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

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

在 MIMO 雷达系统中, 目标的尺寸通常远小于目标中心到各发射雷达及接收雷达间的距离, 而且旋转半径相对于目标与各雷达间的距离来说更是微小的变化量。因此, 旋转散射点 P 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 C 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 C 连线与 x 轴的夹角为 α_m, β_n , 如图 1 虚线所示。一般情况下, 对于低速运动目标, 在较短的观测时间内可以认为夹角 α_m, β_n 近似不变, 因此得到 $\tan \alpha_m \approx y_c/(x_c - x_{tm})$, $\tan \beta_n \approx y_c/(x_c - x_{tn})$ 。经过近似计算后有

$$R_m(t_m; m) \approx R_{mc}(t_m; m) + r \cos(\alpha_m + \theta - \alpha_n), \quad (6)$$

$$R_n(t_m; n) \approx R_{nc}(t_m; n) + r \cos(\alpha_m + \theta - \beta_n), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } R(t_m; m, n) - R_c(t_m; m, n) &= \\ r \cos(\alpha_m + \theta - \alpha_n) + r \cos(\alpha_m + \theta - \beta_n) &= \\ r \sqrt{\sin \alpha_m + \sin \beta_n)^2 + (\cos \alpha_m + \cos \beta_n)^2} \cdot \\ \cos(\alpha_m + \theta - \gamma), \quad (8) \end{aligned}$$

式中: 参数 γ 满足

$$\tan \gamma = (\sin \alpha_m + \sin \beta_n) / (\cos \alpha_m + \cos \beta_n).$$

从式(8)可得距离差值 $R(t_m; m, n) - R_c(t_m; m, n)$ 随慢时间 t_m 作正弦形式的变化, 因此旋转散射点 P 在距离-慢时间平面上将对应一条初始相位为 $\varphi = \theta - \gamma$ 幅值为 $A = r \cdot$

$\sqrt{\sin \alpha_m + \sin \beta_n)^2 + (\cos \alpha_m + \cos \beta_n)^2}$ 的正弦曲线, 这就是由旋转引入的微多普勒效应。与传统单基雷达系统中目标部件旋转引入的微多普勒效应不同, 该曲线的幅值和初始相位均与选取的收发雷达组合有关。本文暂且不考虑选取不同的收发雷达组合时对初始相位 φ 的影响, 重点分析其对幅值 A 的改变, 不妨令 $\sqrt{\sin \alpha_m + \sin \beta_n)^2 + (\cos \alpha_m + \cos \beta_n)^2}$ 为幅值放大系数。当选定 MIMO 雷达系统中某组收发雷达, 如选择第 m 个发射雷达和第 n 个接收雷达后, α_m, β_n 的值便可认为是确定的常数, 这样幅值放大系数也为定值, 因此只需提取各正弦曲线的幅值, 便可根据下式对旋转半径 r 进行估值

$$r = A / \sqrt{\sin \alpha_m + \sin \beta_n)^2 + (\cos \alpha_m + \cos \beta_n)^2}. \quad (9)$$

MIMO 雷达系统能形成多个收发通道, 因此能同时得到多组观测数据, 运用式(9)可计算得到多个旋转半径的估值, 对所得估值再进行一定的数据处理, 便能得到与真实值非常接近的旋转半径估值。

2 仿真实验

假设 MIMO 雷达系统由位于 x 轴上的 3 个发射雷达和 8 个接收雷达组成。发射雷达和接收雷达的横坐标分别为 $(-6\ 000, -4\ 000, -2\ 000)$, $(3\ 000, 5\ 000, 8\ 000, 10\ 000, 12\ 000, 15\ 000, 17\ 000, 20\ 000)$, 单位均为 m。各发射雷达辐射的 OFD-LFM 信号脉宽 1 μ s, 起始载频为 8 GHz, 带宽均为 300 MHz, 获得的距离分辨率为 0.5 m。脉冲重复频率为 1 000 Hz, 回波信号时长为 1 s。目标以速度 $v = 300$ m/s 沿 x 轴正向匀速运动, 中心点 C 在初

始时刻的坐标为(6 000, 8 000), 目标包含绕 C 点旋转的散射点 P , 旋转半径、旋转频率及初始相位分别为 5 m, 5 Hz, $\pi/5$ rad。

2.1 旋转的微多普勒效应验证

包含 3 个发射雷达和 8 个接收雷达的 MIMO 雷达系统共能组成 24 组观测雷达, 不妨把由第 m 个发射雷达和第 n 个接收雷达组成的观测雷达组记为 (m, n) , 任意选定两组观测雷达, 如 $(1, 1)$ 和 $(2, 8)$, 得到的微多普勒曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出, 2 条微多普勒曲线的幅值和初始相位互不相同, 这与理论推导结果相符。

2.2 旋转半径估值

在假定的 MIMO 雷达系统下, 共能得到 24 组观测数据, 其幅值放大系数、提取的微多普勒正弦曲

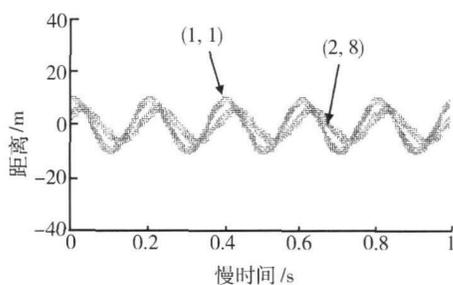


图 2 不同观测雷达组得到的微多普勒曲线
Fig.2 Micro-Doppler curves obtained with different observation radar pairs

线的幅值及按式(9)估计的旋转半径值分别如表 1 ~ 3 所示, 其中 $T_1 \sim T_3$, $R_1 \sim R_8$ 分别表示 3 个发射雷达及 8 个接收雷达。

表 1 幅值放大系数

Table 1 Magnified coefficient of amplitude

m

发射雷达	接收雷达							
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
T_1	1.903 4	1.818 6	1.634 8	1.499 4	1.374 4	1.222 0	1.143 1	1.051 5
T_2	1.928 3	1.853 0	1.683 2	1.555 3	1.436 1	1.289 5	1.213 2	1.124 2
T_3	1.954 7	1.891 7	1.740 4	1.622 5	1.510 9	1.372 1	1.299 3	1.214 0

表 2 提取的微多普勒正弦曲线幅值

Table 2 Extracted amplitude of micro-Doppler sinusoidal curves

m

发射雷达	接收雷达							
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
T_1	9.516 6	9.090 9	8.057 9	7.819 9	7.142 9	6.250 0	5.660 4	4.687 5
T_2	9.752 3	9.310 3	8.333 3	8.088 2	7.377 0	6.481 5	5.660 4	5.389 2
T_3	9.615 4	9.677 4	8.705 4	7.692 3	7.803 5	6.521 7	6.213 0	5.932 2

表 3 旋转半径的估值

Table 3 Estimated rotating radii

m

发射雷达	接收雷达							
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
T_1	4.999 8	4.998 8	4.929 0	5.215 4	5.197 1	5.114 6	4.951 8	4.457 9
T_2	5.057 5	5.024 4	4.950 9	5.200 4	5.136 8	5.026 4	4.665 7	4.793 8
T_3	4.919 1	5.115 7	5.002 0	4.741 0	5.164 8	4.753 1	4.781 8	4.886 5

由表 3 可以看出, 计算得到的 24 个旋转半径估值均在其真实值附近振荡, 但根据不同收发雷达组合测得的数据估算出的旋转半径与真实值之间的偏差互不相同, 其中收发雷达组合 $(1, 8)$ 得到的估计

值与真实值偏差最大。为了充分利用 24 组观测数据, 有多种数据处理方法, 对得到的旋转半径估值数据取数学期望, 用期望值 $\bar{r} = 4.961 8$ m 作为最终的旋转半径估值, 当系统距离分辨率为 0.5 m 时, 可以

认为它非常接近旋转半径的理论值 $5 m_0$ 。

3 结束语

与传统单基雷达系统相比, MIMO 雷达系统包含多个发射雷达和接收雷达, “多发多收”的工作方式使其与传统雷达系统相比具有明显的优势。就 M 发 N 收 MIMO 雷达系统而言, 存在 $M \times N$ 种观测雷达的组合形式, 也就意味着能获得 $M \times N$ 组观测数据, 大大提高了雷达的参数估计精度及检测效率。本文主要探讨了正交频分线性调频 MIMO 雷达系统中由目标部件旋转引入的微多普勒效应, 并通过分析得到了旋转半径的表达式, 基于 MIMO 雷达获得的多组观测值, 利用统计学中取数学期望的方法所得的旋转半径估值与真实值非常接近。

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.

[3] BAI Xue-tu, XING Meng-dao, ZHOU Feng, et al. Imaging of Micromotion Targets With Rotating Parts Based on Empirical Mode Decomposition [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514 - 3523.

[4] ZHANG Qun, 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.

[5] 李金梁, 王雪松, 刘阳, 等. 雷达目标旋转部件的微 Doppler 效应 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 583 - 587.

[6] 刘维建, 陈建文. 弹道导弹目标微动特征分析及参数提取 [J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(3): 175 - 177.

[7] Eran Fishler, Alex Haimovich, Rick Blum, et al. MIMO Radar: an Idea whose Time has Come. Proceeding of the IEEE Radar Conference [C] // Philadelphia, PA, 2004: 71 - 78.

[8] Eran Fishler, Alex Haimovich, Rick Blum, et al. Performance of MIMO Radar Systems: Advantages of Angular Diversity. Conference Record of the 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers [C] // Pacific Grove, CA, 2004: 305 - 309.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

(上接第 94 页)

[5] RAJKUMAR R, GAGLIARDI M, SHA L. The Real-Time Publisher/Subscriber Inter-Process Communication Model for Distributed Real-Time Systems: Design and Implementation [C] // Proceeding of the 1st IEEE Real-Time Technology and Applications Symposium, Denver, Colorado, USA, May 1995: 66 - 75.

[6] 马建刚, 黄涛, 汪锦岭, 等. 面向大规模分布式计算发布订阅系统核心技术 [J]. 软件学报, 2006, 17(1): 134 - 147.

[7] 宛海宁. 基于 Pub/Sub 的战场态势信息分发方法与原型系统研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.

[8] OMG. Data Distribution Service for Real-time Systems Specification version 1.2. [R/OL]. (2007 - 01 - 01) [2010 - 06 - 03]. <http://www.omg.org/spec/DDS/1.2>.

[9] GERARDO P C. OMG Data-Distribution Service: Architectural Overview [C] // Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW ' 03), 2003: 200 - 206.

[10] GERARDO P C. DDS Spec Outfits Publish-Subscribe Technology for the GIG [J/OL]. COTS Journal, 2005. 4. (2005 - 04 - 01) [2010 - 06 - 03]. <http://www.cotsjournalonline.com/articles/view/100296>.