

# OFD - LFM 信号体制 MIMO 雷达 运动目标 HRRP 合成方法

黄旭华<sup>1,2</sup>, 李项军<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 95037 部队, 湖北武汉, 430073; 3. 93942 部队, 陕西咸阳, 712000)

**摘要** 针对 OFD - LFM 信号体制 MIMO 雷达运动目标的高分辨距离像(HRRP)合成问题展开了相关的研究工作, 首先给出了 OFD - LFM 信号体制 MIMO 高分辨雷达成像的几何关系图, 在此基础上, 通过严格的理论推导和详细的原理论述, 提出了基于相位补偿的 OFD - LFM 信号体制 MIMO 雷达运动目标的 HRRP 合成方法, 该方法利用了 OFD - LFM 信号中各子载波信号之间的正交性, 可有效地合成出运动目标的 HRRP。此外, 还进一步分析了 HRRP 不发生卷绕的条件。仿真结果证明了本文方法的有效性。

**关键词** MIMO 雷达; OFD - LFM 信号; 高分辨成像; 相位补偿

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.007

**中图分类号** TN957 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0030-05

多发多收(Mingle - Input Multiple - Output, MIMO)系统采用多天线的空域分集技术<sup>[1]</sup>, 以达到利用空间域采样来代替时间域采样的目的, 可为有效减少积累、处理时间提供新的思路和途径<sup>[2]</sup>。若将 MIMO 的概念引入到高分辨雷达成像中来对运动目标进行探测和成像, 即可构成运动目标的 MIMO 高分辨雷达成像系统<sup>[3-9]</sup>。该系统不仅避免了传统运动目标 ISAR 成像技术中所需的很长成像积累时间, 同时, 也可以避免时间域上的多脉冲采样对不同时刻运动目标观测回波的运动补偿问题<sup>[4]</sup>。

在 MIMO 高分辨雷达成像过程中, 由于各个接收天线单元均需要接收到许多不同发射天线单元所发射出的雷达辐射信号, 那么, 如何设计合理的正交信号形式, 使得各个接收天线单元可以有效地分离来自不同发射天线单元的不同雷达辐射信号, 一直是有待研究的重要问题。文献[10]提出采用正交频分线性调频(OFD - LFM)信号来实现。OFD - LFM 信号是利用一种在通信系统中被广泛研究的多载波数字调制方式——正交频分复用(OFDM)技术来调制传统线性调频(LFM)信号而产生的新信号形式<sup>[5]</sup>, OFD - LFM 信号实质上体现了发射信号的多载频特点<sup>[6-7]</sup>, 同时, OFD - LFM 信号在同一时刻不同载频下的各路子载波也具有很好的正交性。此外, 将 OFD - LFM 信号引入到 MIMO 高分辨雷达对运动目标的探测与成像中还具有如下 2 个优势<sup>[11]</sup>: ①利用 OFD - LFM 信号来合成距离方向上的大带宽以获得成像所需的距离高分辨率, 这样可以明显缩短相干积累时间; ②利用 OFD - LFM 信号进行高分辨成像的过程是在同一时间收发所有的子载波, 这样可以克服雷达对运动目标径向运动速度敏感性的问题。

基于以上分析, 本文针对基于 OFD - LFM 信号体制的 MIMO 雷达进一步展开研究, 提出了该体制雷达基于相位补偿的运动目标高分辨距离像(High - Resolution Range Profile, HRRP)合成方法, 并利用相关的仿真实验验证了本文方法的有效性。

收稿日期: 2012 - 04 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971100)

作者简介: 黄旭华(1980 - ), 女, 陕西临潼人, 博士生, 主要从事 MIMO 雷达信号处理研究。

E - mail: huangxuhua101@163.com

## 1 OFD-LFM 信号体制 MIMO 高分辨雷达成像几何关系

假设 MIMO 雷达天线排布见图 1,  $N$  个接收天线单元, 记为  $x_1, x_2, \dots, x_N$ 。发射天线位于  $XOY$  坐标系的原点  $O$ , 接收天线阵是均匀线阵, 间隔单元为  $d$ , 沿  $X$  轴方向依次排布, 其中  $x_j$  表示任一接收天线的横向位置。 $Q$  为目标的一个散射点,  $P$  为参考点, 在  $XOY$  坐标系内坐标为  $(x_p, y_p)$ , 则  $Q$  点的坐标为  $(x_p + \Delta x, y_p + \Delta y)$ , 目标的运动速度为  $v$ 。

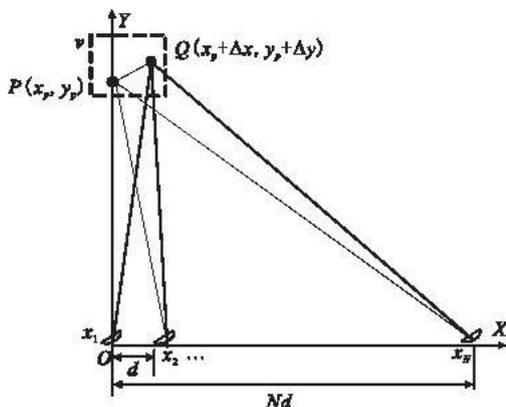


图 1 MIMO 雷达天线阵列与目标之间的几何关系图

Fig. 1 Geometry of MIMO radar array and target

## 2 基于相位补偿的 OFD-LFM 信号频谱合成及 HRRP 成像原理

本文采用的 OFD-LFM 信号是将传统的 LFM 信号调制到多路子载波上进行叠加后在 MIMO 雷达系统中的不同发射天线单元分别依次发射, 假设 MIMO 雷达系统由  $N$  个发射天线单元和  $N$  个接收天线单元组成, 每个发射天线单元发射一路子载波信号, 则共包含  $N$  路子载波信号, 其中第  $j$  路 OFD-LFM 子载波信号表达式为:

$$g(t, j) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j_0 2\pi\left(f_c t + \frac{q}{T_p} j t + \frac{1}{2} \mu t^2\right)\right), j = 1, 2, \dots, N; q \in N \quad (1)$$

式中:  $t$  为快时间;  $T_p$  为脉冲宽度;  $f_c$  为起始载频;  $\mu$  为调频斜率;  $q$  为自然数;  $j_0$  为虚数单位; 相邻 2 路子载波之间的频率间隔为  $\Delta f = \frac{q}{T_p}$ 。容易证明  $g(t, j)$  间相互正交<sup>[11]</sup>, 即满足:

$$\int_{-T_p/2}^{T_p/2} g(t, j_1) g^*(t, j_2) dt = \begin{cases} G, & j_1 = j_2 \\ 0, & j_1 \neq j_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $G$  为常数。在实际工程应用中, 应选择合适的  $q$  值以保证各路信号之间的频率间隔。为分析问题简便, 下文均假设各路子载波信号之间保持理想正交。

则 MIMO 雷达发射天线单元所发射的所有信号, 可依次写为:

$$s_j(t) = g(t, j), j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

设存在点目标模型散射点  $Q$ , 则第  $k$  个接收天线单元所接收到的散射点  $Q$  的回波可写为:

$$s_{\text{return}_k}(t) = \sum_{j=1}^N \sigma g(t - \tau_{k,j}, j) \quad (4)$$

式中:  $\sigma$  为散射点  $Q$  的散射系数;  $\tau_{k,j}$  为第  $j$  个发射天线单元与第  $k$  个接收天线单元组合起来所构成的雷达收发系统所对应的散射点回波时间延迟。假设散射点  $Q$  与 MIMO 雷达中  $N$  个发射天线单元之间的距离分别为  $R(x_1), R(x_2), \dots, R(x_N)$ , 散射点  $Q$  与 MIMO 雷达中  $N$  个接收天线单元之间的距离分别为  $R'(x_1), R'(x_2), \dots, R'(x_N)$ , 则:

$$\tau_{k,j} = (R(x_j) + R'(x_k))/c \quad (5)$$

式中  $c$  为光速。

为了有效分离出各路子载波信号, 可以采取 LFM 信号特有的拉伸处理方法, 即利用  $s_{\text{return}_k}(t)$  分别与所发射的各路子载波信号进行拉伸处理 (或称“dechirp”处理) 后, 再经过低通滤波器 (LPF) 分离出各路子载波信号。

在实际应用中, 通常采用参考散射点的回波信号代替发射信号来作为拉伸处理的参考信号。设参考点为  $P$ , 假设其与 MIMO 雷达中  $N$  个发射天线单元之间的距离分别为  $R_p'(x_1), R_p'(x_2), \dots, R_p'(x_N)$ , 其与 MIMO 雷

达中  $N$  个接收天线单元之间的距离分别为  $R(x_1), R(x_2), \dots, R(x_N)$ , 则参考信号可以写为:

$$g_{0j}(t, j) = g(t - \tau_0, j) \quad (6) \quad \tau_0 = R_p(x_j) + R_p'(x_k))/c \quad (7)$$

利用该参考信号进行拉伸处理后,可以得到:

$$s_{c-k}(t) = s_{\text{return}_k}(t) g_{0j}^*(t, j) = \sigma \sum_{j=1}^N \text{rect}\left(\frac{t - \tau_{k-j'}}{T_p}\right) \exp\left(j_0 2\pi \left(-f_c \Delta\tau_{k-j'} + \frac{j' - j}{T_p} t - \frac{q}{T_p} (j' \tau_{k-j'} - j \tau_0) - \mu \Delta\tau_{k-j'} t + \frac{\mu(\tau_{k-j'}^2 - \tau_0^2)}{2}\right)\right) \quad (8)$$

式中  $\Delta\tau_{k-j'} = \tau_{k-j'} - \tau_0$ 。

当  $s_{c-k}(t)$  通过低通滤波器后,只有  $j' = j$  的分量得以输出,关于  $t$  做傅里叶变换 (Fourier Transform, FT), 可以得到各路子载波对应的粗分辨率距离像 (Coarse-Resolution Range Profile, CRRP), 如下式:

$$S_{\text{CRRP}_k}(f, i) = \sigma T_p \exp\left(j_0 2\pi \left(-\left(f_c + \frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau_{k-j} + \frac{\mu(\tau_{k-j}^2 - \tau_0^2)}{2}\right)\right) \exp(-j_0 f \tau_{k-j}) \sin(T_p(f + \mu \Delta\tau_{k-j})) \quad (9)$$

可见  $|S_{\text{CRRP}_k}(f, j)|$  是一个  $\sin$  函数,其峰值出现在  $f = -\mu \Delta\tau_{k-j}$  处,此即由单路 LFM 信号获得的目标距离像,由于在 OFD-LFM 信号中,单路 LFM 信号的带宽通常较小,对应的距离分辨率较低,对于通常的运动目标,其尺寸可认为小于单路 LFM 信号的距离分辨单元。进一步去除 RVP 项和包络斜置项后,获得如下表达式:

$$S_{\text{CRRP1}_k}(f, j) = \sigma T_p \sin(T_p(f + \mu \Delta\tau_{k-j})) \exp\left(j_0 2\pi \left(-\left(f_c + \frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau_{k-j}\right)\right) \quad (10)$$

取各路  $S_{\text{CRRP1}_k}(f, j)$  信号模值的峰值点,即令  $f = -\mu \Delta\tau_{k-j}$ , 得到:

$$S_{\text{CRRP1}_k}(j) = \sigma T_p \exp\left(j_0 2\pi \left(-\left(f_c + \frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau_{k-j}\right)\right) \quad (11)$$

通常对上式做关于  $i$  的  $N$  点逆离散傅里叶变换 (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT), 即可等效实现对  $N$  路 LFM 信号的频谱合成,也即获得了 HRRP。但由于  $\Delta\tau_{k-j}$  是关于  $k$  和  $j$  的函数,因此,无法获得有效的 HRRP,必须要进行相应的相位补偿处理,即:

$$S_{\text{CRRP2}_k}(j) = \sigma T_p \exp\left(j_0 2\pi \left(-\left(f_c + \frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau_{k-j}\right)\right) \exp\left(-j_0 2\pi \left(\frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau'\right) = \sigma T_p \exp\left(j_0 2\pi \left(-\left(f_c + \frac{qj}{T_p}\right) \Delta\tau\right)\right) \quad (12)$$

式中:

$$\Delta\tau' = (R(x_j) - R'(x_k))/c \quad (13)$$

此时,  $\Delta\tau$  为一个常数。再进行关于  $j$  的  $N$  点 IDFT, 即获得了有效的 HRRP:

$$S_{\text{HRRP}}(k_x) = \sigma T_p \sin\left(k + \frac{q}{T_p} \Delta\tau\right) \exp(-j_0 2\pi f_c \Delta\tau) \quad (14)$$

可见  $|S_{\text{HRRP}}(k)|$  的峰值出现在  $k_x = \frac{-q \Delta\tau}{T_p}$  处,从而实现了目标的距离维高分辨成像。

经过上述处理, OFD-LFM 信号获得的合成带宽为  $N\Delta f = Nq/T_p$ , 对应的距离分辨率为  $cT_p/(2Nq)$ , 由于 IDFT 变换的性质,  $k_x$  的范围为  $[-\pi, \pi]$ , 因此对目标径向尺寸有以下限制:

$$-cT_p/4q < \Delta R < cT_p/4q \quad (15)$$

式中  $\Delta R = c\tau_{k-j} - c\tau_0$ , 即目标必须位于一个不模糊距离区间之内。当目标尺寸不满足上述公式条件时,由 IDFT 性质可知,其 HRRP 将出现“卷绕”现象。

### 3 仿真实验

为了验证本文方法的有效性,下面展开相关的仿真实验。假设雷达发射 OFD-LFM 信号初始载频为 10 GHz, 脉冲宽度为 1  $\mu\text{s}$ , 在脉冲持续时间内共发射了 50 路子载波, 即  $N = 50$ , 相邻 2 路子载波的频率间隔为 6 MHz, 这里, 取  $q = 6$ , 每路子载波的调频斜率为  $12.0 \times 10^{12}$ , 若将各路子载波综合起来处理, 可获得的合成带宽  $B = 300$  MHz, 对应的距离分辨率为  $\Delta_r = 0.5$  m。假设 MIMO 高分辨雷达系统模型由 50 个收发同置的天线阵列单元组成, 每个发射天线单元分别发射那 50 路不同的子载波信号, 每个接收天线单元均将所有发射天线单元所发射的雷达辐射信号全部接收, 因此, 在每个天线单元处均可合成出一个该天线单元视角下

的运动目标 HRRP<sup>[12]</sup>。

假设运动目标散射点模型见图 2(a), 从图 2(a) 中可以看出运动目标在距离方向上长度大约为 10 m, 依据式 (15),  $cT_p/4q = 12.5$  m, 由于  $-12.5 \text{ m} \leq 10 \text{ m} \leq 12.5 \text{ m}$ , 因此, 仿真条件满足式 (15), 在距离方向上不会发生卷绕现象。图 2(b) 是第 1 个接收天线单元收到所有雷达辐射信号并进行低通滤波处理后的结果, 图 2(c) 是未进行相位补偿时, 第 1 个接收天线单元合成出的运动目标 HRRP, 图 2(d) 是进行相位补偿后, 第 1 个接收天线单元合成出的运动目标 HRRP。比较图 2(c) 与图 2(d) 可以看出, 相位补偿后获得的 HRRP 才是有效的。

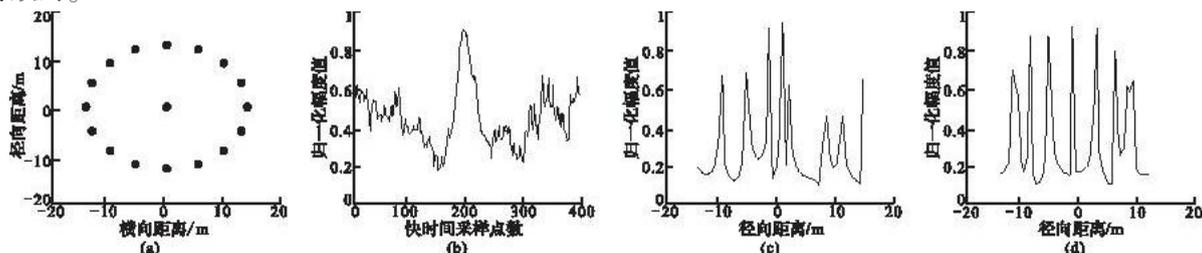


图2 本文方法在 HRRP 无卷绕下获得的结果

Fig. 2 HRRP by using the proposed method at non-wrapped

图 3 给出了在运动目标 HRRP 存在卷绕情况下的仿真结果, 即当运动目标尺寸大于 12.5 m 时, 假设运动目标尺寸为 15 m, 见图 3(a)。图 3(b) 所示结果为存在卷绕情况下第 1 个接收天线单元合成出的运动目标 HRRP。对比图 2(d) 和图 3(b) 可以看出, 由于 HRRP 的卷绕现象使得许多散射点信息重叠在一起, 无法准确分清楚。

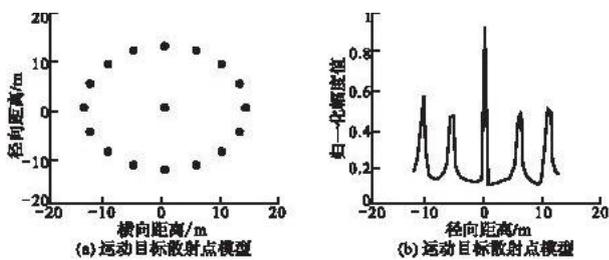


图3 本文方法在 HRRP 存在卷绕下获得的结果

Fig. 3 HRRP by using the proposed method at wrapped

## 4 结束语

本文针对 OFD-LFM 信号体制 MIMO 雷达运动目标的 HRRP 合成问题展开研究, 建立了 OFD-LFM 信号体制 MIMO 高分辨雷达成像系统模型, 并在该模型的基础上, 通过严格的理论推导和原理论述提出了基于相位补偿的 OFD-LFM 信号体制 MIMO 雷达运动目标的 HRRP 合成方法, 该方法利用了 OFD-LFM 信号中各子载波信号之间的正交性, 可有效地合成出运动目标的 HRRP。同时, 进一步推导出了 HRRP 不发生卷绕的条件。

## 参考文献 (References):

- [1] Fishler E, Haimovich A, Blum R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceedings of the IEEE radar conference. Philadelphia, PA, USA: IEEE press, 2004: 71-78.
- [2] Changzheng Ma, Tat Soon Yeo, Junjie Feng, et al. MIMO Radar Wide Band Array Range - Angle Imaging [J]. PIERS online, 2009, 5(1): 21-29.
- [3] 王怀军, 许红波, 陆珉, 等. 基于 MIMO 雷达的高分辨成像方法 [J]. 微波学报, 2009, 25(5): 79-84.  
WANG Huaijun, XU Hongbo, LU Min, et al. High-resolution imaging method based on MIMO radar [J]. Journal of micro-waves, 2009, 25(5): 79-05. (in Chinese)
- [4] 朱宇涛, 郁文贤, 粟毅. 一种基于 MIMO 技术的 ISAR 成像方法 [J]. 电子学报, 2008, 37(9): 1885-1894.  
ZHU Yutao, YU Wenxian, SU Yi. An ISAR imaging method based on MIMO technique [J]. Acta electronica sinica, 2008, 37(9): 1885-1894. (in Chinese)
- [5] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于 OFDM 的多载波调制雷达系统信号处理及检测 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1298-1300.  
GU Chen, ZHANG Jindong, ZHU Xiaohua. Signal processing and detecting for multicarrier modulated radar system based on

- OFDM [J]. Journal of electronics & information technology, 2009, 31(6): 1298 - 1300. (in Chinese)
- [6] 戴喜增, 许稼, 彭应宁, 等. FD - MIMO 距离高分辨雷达及其旁瓣抑制[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(9): 2033 - 2037.
- DAI Xizeng, XU Jia, PENG Yingning, et al. High resolution range imaging and sidelobe suppression based on FD - MIMO Radar [J]. Journal of electronics & information technology, 2008, 30(9): 2033 - 2037. (in Chinese)
- [7] 杨明磊, 张守宏, 陈伯孝, 等. 多载频 MIMO 雷达的一种新的信号处理方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 147 - 151.
- YANG Minglei, ZHANG Shouhong, CHEN Boxiao, et al. A novel signal processing approach for the multi - carrier MIMO radar [J]. Journal of electronics & information technology, 2009, 31(1): 147 - 151. (in Chinese)
- [8] Su Y, Chen A L, Ma Xy, et al. High - resolution imaging using a wideband MIMO radar system with two distributed arrays [J]. IEEE transactions on image processing, 2010, 19(5): 1280 - 1289.
- [9] 王怀军, 粟毅, 黄春琳. 基于天线布阵的 MIMO 雷达成像研究[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1203 - 1208.
- WANG Huaijun, SU Yi, HUANG Chunlin. Study on MIMO radar imaging based on antenna array [J]. Signal processing, 2009, 25(8): 1203 - 1208. (in Chinese)
- [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.
- LIU Bo, HAN Chunlin, MIAO Jianghong. OFD - LEM signal design and performance analysis for MIMO radar [J]. Journal of university of electronic science and technology of China, 2009, 38(1): 28 - 31. (in Chinese)
- [11] 罗迎, 张群, 封同安, 等. OFD - LFM MIMO 雷达中旋转目标微多普勒效应分析及三维微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 8 - 13.
- LUO Yin, ZHANG Qun, FENG Tongan, et al. Micro - doppler effect analysis of rotating target and three - dimensional micro - motion feature extraction in OFD - LEM MIMO radar [J]. Journal of electronics & information technology, 2011, 33(1): 8 - 13. (in Chinese)
- [12] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2006. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

## Moving Target HRRP Synthesizing Method for MIMO Radar with OFD - LFM Signal

HUANG Xu - hua<sup>1,2</sup>, LI Xiang - jun<sup>3</sup>

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, Shaanxi, China; 2. Unit 95037, Wuhan 430073, China; 3. Unit 93942, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Multiple - Input Multiple - Output (MIMO) radar imaging with OFD - LEM has an important and practical value for non - cooperative moving targets detection and recognition. Some researches on the problem about moving target high - resolution range profile (HRRP) synthesizing method for MIMO radar with OFD - LFM signal are carried out in this paper. First of all, the imaging geometric figure of MIMO high - resolution radar with OFD - LFM signal is established. On the basis of that, a new moving target HRRP synthesizing method based on phase compensation for MIMO radar with OFD - LFM signal is proposed via strictly theoretical deduction and detailed principle demonstration. The moving target HRRP can be synthesized effectively by using the proposed method, because the orthogonality among the different sub - pulses is utilized. What's more, the condition of unwrapped HRRP is also obtained successfully. The simulation results validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** MIMO radar; OFD - LFM signal; high - resolution imaging; phase compensation