

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108373

DDMA-LFM 波形的 MIMO 模糊函数分析

梅 慧 易 莛 宋 柯 祝伟才 汪 超 李 乾

(上海无线电设备研究所 上海 201109)

摘要: 由于 MIMO 雷达波形的选择与参数设计直接决定了雷达的探测性能、系统分辨率、探测精度以及潜在的抗干扰性能,基于模糊函数理论以及 MIMO 阵型参数,对 DDMA-LFM 波形集的时频空三维的模糊函数进行分析,分析其波形集与阵列流型相互作用后同雷达在距离-速度-方位三个维度的探测性能的关系。结合发射波形集与雷达阵列流型推导三维的时延-多普勒频率-空间方位 MIMO 模糊函数,通过公式推导以及仿真分析发现,DDMA-LFM 波形无需通过优化编码等,保证了信号的连续性同时简化了设计过程。同时,DDMA-LFM 距离(时延)分辨性能与空间方位可独立分离,多普勒频率与空间方位存在相互耦合,但在有效多普勒谱宽内不影响雷达分辨性能,且波形集与阵列相互作用能一定程度上提高某些方位的角度分辨率达 5° 左右。

关键词: 多普勒谱分多址;线性调频;多输入多输出;模糊函数

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Analysis of MIMO ambiguity function of DDMA-LFM waveforms

Mei Hui Yi Kun Song Ke Zhu Weicai Wang Chao Li Qian

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Selection and parameter design of MIMO radar waveform directly determine the key radar performance such as detection range, system resolution and accuracy, and potential ability of anti-interference. Based on the fuzzy function theory and MIMO formation parameters, analyzes the time-frequency-space 3D fuzzy function of DDMA-LFM waveform set, and analyzes the relationship between the waveform set and array flow pattern and radar detection performance in range-velocity-azimuth three dimensions. Combing the transmitted waveform set and the radar array flow pattern to derive the three-dimensional time delay-Doppler frequency-space orientation MIMO ambiguity function. Through formula analysis and simulation results, it is concluded that the continuity of the waveform is ensured and the design process is simplified. In the process of designing the orthogonal DDMA-LFM waveform parameters of the multiple-input multiple-output (MIMO) radar system, there is no need to optimize the coding. What's more, the range (time delay) resolution performance and the spatial orientation can be separated independently, and the Doppler frequency and the spatial orientation are mutually coupled but the radar resolution performance is not affected within the effective Doppler spectral width, meanwhile the interaction between the waveform set and the array can improve the angular resolution of certain orientations to a certain extent about 5° .

Keywords: DDMA; LFM; MIMO; ambiguity function

0 引 言

多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 技术最早产生于无线通信系统,为了充分利用频谱资源,在无线链路的两端进行多个信号的同时发射与接收,极大地增强了通信系统的信息容量。MIMO 雷达的核心思想就是拥有多个发射源和接收源,将收到的信息进行联合处理与分析。与相控阵雷达不同, MIMO 雷达各个发射

阵元发射不同的波形,各个发射阵元在空间上辐射相同的区域且方向图不相干叠加,可同时对整个观测区域进行探测,虽然与相控阵雷达相比需要更长的积累时间,但具备更好的系统鲁棒性、杂波抑制能力与探测能力。分布式 MIMO 雷达的发射单元与接收阵列一般相差较远,可以从不同的方向对目标进行探测,这种空间分集特性可以有效改善雷达系统的探测性能,提高探测结果的准确度和可靠性。而集中式 MIMO 雷达的发射与接收阵列布置集中相

隔较近,在相同的阵列面积上可以获得更大的虚拟孔径从而提高雷达系统的角度分辨率,同时在信号处理方面有更大的自由度。

在大多数 MIMO 雷达资料中,都认为发射阵元的发射波形相互正交,也有部分采用非正交的相关波形^[1]进行目标探测。对于 MIMO 正交信号,也多采用分时、分频、相位编码等技术,时间错位 LFM 信号成功应用于澳大利亚 MIMO 高频超视距雷达^[2],多载频技术应用于哈工大分布式舰载雷达系统、武汉大学多基地岸基高频雷达系统以及 BAE systems 的 MIMO 体制 HFGWR 等,对其单个发射采用不同的载频实现信号正交,对不同载频的信号进行联合处理与融合观测。另有研究者基于随机离散载频的模糊度函数进行了多载频 HFGWR 波形设计相关研究^[3-7],以及对多载频相位编码信号基于模糊函数、旁瓣抑制及非均匀虚拟阵列等方面进行了多载频的分析及频率选择方法研究^[5]。由于高频段复杂的电磁环境,非连续频谱的频率编码、相位编码等信号形式在 HFGWR 中也正在研究与应用中,如基于最优化设计的 DFCW、DFCW-LFM^[6-8]、正交相位编码信号^[9-11]等。考虑到 LFM 信号具备的高压缩比、强多普勒容忍性、波形简单等长处,常广弘等^[12]针对 4 种典型的收发共址高频地波雷达 MIMO 信号从分辨率、旁瓣电平和互相关性能进行了分析与评价,认为相比于 DFCW 信号,基于线性调频进行离散频率设计的 DFCW-LFM 信号具备更好的正交性。而基于 LFM 信号在 MIMO 体制 HFGWR 中的应用,DFCW-LFM、正交频分(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)线性调频信号^[11,13-15]设计较为复杂且可能存在距离多普勒耦合、旁瓣过高等问题且优化趋于复杂,而多载频 LFM 信号^[16]则需占用较宽的工作频带,对雷达设备的线性度要求较高,频带利用率低且受周围电磁环境影响尤其是电台干扰可能会更严重,因而本文选择从多普勒谱分多址(doppler deviation multiple access, DDMA)的层面出发,考虑设计 DDMA-LFM 正交波形集应用于集中式 MIMO 体制 HFGWR 系统。

利用慢时域相位编码产生多普勒频率偏置线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号,使得多个多普勒频率偏置的 LFM 信号在多普勒谱上占据不同的频谱范围,实现多个同频带多普勒谱分多址(Doppler deviation multiple access, DDMA),即 DDMA-LFM 正交波形^[2]。相比较频率编码类的 LFM 信号,DDMA-LFM 占用的频带宽,且多普勒频谱利用率高。不仅简单且具有较好的正交性,在进行 MIMO 雷达系统的正交波形参数设计过程中,无需通过优化编码等,保证了信号的连续性同时简化了设计过程。

在传统的单孔径雷达中,模糊函数用于表述雷达波形的时延-多普勒分辨率。而在 MIMO 雷达中,多个雷达波形从不同的位置发射,各个波形由于阵列空间流型的影响,

其距离与多普勒分辨率可能会有影响,且结合波形与阵列流型可基于模糊函数分析 MIMO 阵列雷达的空间分辨率。因而,将模糊函数应用于 MIMO 雷达中,扩展成为与距离、多普勒频率以及空间方位相关的三维函数进行分析,对于雷达波形和阵列的选择与设计具有重要的参考意义^[17-19]。

针对特殊场景需求下的集中式 MIMO 体制 HFGWR 系统的模糊函数研究较少这一问题,本文通过对 DDMA-LFM 正交波形的 MIMO 模糊函数进行分析,通过理论推导及仿真分析研究 DDMA-LFM 波形集与阵列相互作用对雷达分辨率的影响。

1 模糊函数理论

模糊函数可以定量衡量在各种多目标环境下雷达区分两个及两个以上临近目标的能力,可从目标的距离、速度、方位、仰角等方面进行考虑。其中目标的距离和速度可在不考虑雷达阵列的情况下进行获取,仅与雷达发射的波形相关,可用于直观分析单孔径雷达的固有分辨率,目标的方位和仰角分辨能力则与雷达的阵列大小、结构有直接关系。

经典的 Woodward 模糊函数理论基于完全均方误差准则来分辨已知波形和时延、频移后的波形^[20-21]。考虑 (τ_0, f_{d0}) 处的目标,其中 τ_0 表示与目标相关的回波时延, f_{d0} 表示与目标径向速度相关的多普勒频率。接收天线接收的回波经过解调后的基带信号模型可表示为:

$$s^{(\tau_0, f_{d0})}(t) \approx s(t - \tau_0) e^{j2\pi f_{d0} t} \quad (1)$$

假定已知参数 (τ_1, f_{d1}) 的目标回波作为已知波形对 (τ_0, f_{d0}) 处的目标进行参数估计,则两个回波信号的总均方误差为:

$$\int_{-\infty}^{\infty} s^{(\tau_0, f_{d0})}(t) \cdot s^{(\tau_1, f_{d1})}(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \tau_0) \cdot s^*(t - \tau_1) e^{j2\pi(f_{d0} - f_{d1})t} dt \quad (2)$$

在窄带假设的条件下,以最小均方差为最佳分辨准则推导而来的原始信号与时延频移后信号的互相关函数即为雷达波形的模糊函数^[22]:

$$|\chi(\tau, f_d)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot s^*(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \right|^2 \quad (3)$$

其中, $\tau = \tau_0 - \tau_1$ 表示两个回波的时延差, $f_d = f_{d0} - f_{d1}$ 表示其多普勒频率差。该模糊函数是关于时延差、多普勒频率差的二维函数,可根据该模糊函数随时延、频移的变化分析雷达距离、多普勒分辨率及二者之间的耦合情况。

通常认为最佳的模糊函数为图钉型,类似于相同维度下的冲激函数,能量集中于中心主瓣,而在其他区域具有低而平坦的旁瓣。主瓣越集中,对应的距离分辨率、多普勒分辨率越高,雷达对目标的区分能力越强;旁瓣越低,对目标的遮盖影响越小,弱目标主瓣被强目标旁瓣遮挡的可能性则越小。

2 MIMO 雷达模糊函数

在传统的单孔径雷达中,模糊函数用于表述雷达波形的时延-多普勒分辨率。而在 MIMO 雷达中,多个雷达波

形从不同的位置发射,各个波形由于阵列空间流型的影响,其距离与多普勒分辨率可能会受到影响,且结合波形与阵列流型可基于模糊函数分析 MIMO 阵列雷达的空间分辨率。因而,将模糊函数应用于 MIMO 雷达中,扩展成为与距离、多普勒频率以及空间方位相关的三维函数进行分析,对于雷达波形和阵列的选择与设计具有重要的参考意义^[23-25]。

同样地,在窄带假设的条件下基于完全均方误差准则来分辨已知波形和时延、频移、不同方位的波形^[26]。考虑 (τ_0, f_{d0}, f_s) 处的目标,其中 τ_0 表示与目标相关的回波时延, f_{d0} 表示与目标径向速度相关的多普勒频率, f_s 是与阵元位置及目标在空间的方位角相关的空间频率。对于 M 发 L 收且收发共站的 MIMO 雷达系统,为简化分析,假定发射阵列为 M 元均匀阵,阵元间隔为 d_{T1} ,接收阵列为 L 元均匀阵,阵元间隔为 d_R ,目标所在方位雷达阵列的法线夹角为 θ ,雷达中心频率为 f_0 。第 m 个阵元发射信号为 $s_T^m(t)$,则第 l 个接收天线接收的回波经过解调后的基带信号模型可表示为:

$$s_l^{(\tau_0, f_{d0}, f_s)}(t) \approx \sum_{m=1}^M s_T^m(t - \tau_0) \cdot e^{j2\pi f_{d0} t} e^{j2\pi f_s ((m-1)d_{T1}/d_R)} \quad (4)$$

其中, $f_s = -f_0 d_{T1} \sin\theta/c$, $\gamma = d_{T1}/d_R$ 。假定已知参数 (τ_1, f_{d1}, f'_s) 的目标回波作为已知波形对 (τ_0, f_{d0}, f_s) 处的目标进行参数估计,则两个回波信号的总均方误差为:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s_l^{(\tau_0, f_{d0}, f_s)}(t) \cdot s_l^{(\tau_1, f_{d1}, f'_s)}(t) dt = \sum_{l=1}^L e^{j2\pi(f_s - f'_s)(l-1)\gamma} \cdot \left(\sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} s_T^m(t - \tau_0) \cdot s_T^{m'}(t - \tau_1) e^{j2\pi(f_{d0} - f_{d1})t} dt \cdot e^{j2\pi(f_s(m-1) - f'_s(m'-1))} \right) \quad (5)$$

上述等式右边的第 1 部分表示接收阵列的空间处理,与单孔径雷达一样不受波形的影响。等式右边的第 2 部分则说明了发射波形集 $s_T^m(t)$ 对于距离、多普勒、空间方位分辨率的影响。根据模糊函数的描述及上式的推导,MIMO 体制雷达的模糊函数可定义为:

$$\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s) = \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} s_T^m(t) \cdot s_T^{m'}(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \cdot e^{j2\pi(f_s(m-1) - f'_s(m'-1))} = \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M \chi_{m,m'}(\tau, f_d) \cdot e^{j2\pi(f_s(m-1) - f'_s(m'-1))} = \mathbf{a}_T(f_s) \boldsymbol{\chi}(\tau, f_d) \mathbf{a}_T^H(f'_s) \quad (6)$$

其中,

$$\chi_{m,m'}(\tau, f_d) = \int_{-\infty}^{\infty} s_T^m(t) \cdot s_T^{m'}(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_T(f_s) = [1, e^{j2\pi f_s}, \dots, e^{j2\pi f_s(M-1)}]^T \quad (8)$$

式中: $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, $(\cdot)^T$ 表示转置变换。 $\tau = \tau_0 - \tau_1$ 表示波形的时延差, $f_d = f_{d0} - f_{d1}$ 表示波形的多普勒频率差, f_s, f'_s 表示两个目标在空间不同方位角的空间频率, $\mathbf{a}_T(f_s)$ 表征发射阵列的导向矢量, $\boldsymbol{\chi}(\tau, f_d)$ 则是由 $\chi_{m,m'}(\tau, f_d)$ 组成的方阵。

根据式(7),不同方位角的空间频率 f_s, f'_s 不能合并,而是与阵列的阵元位置存在卷积关系,因而该模糊函数不能表示为空间频率差异函数,可认为是关于时延差、多普勒频率差、某一确定目标空间频率下假定空间频率的三维函数。与单孔径雷达模糊函数的定义相同, $m = m'$ 时 $\chi_{m,m'}(\tau, f_d)$ 表示发射波形 $s_T^m(t)$ 的自模糊函数, $m \neq m'$ 时 $\chi_{m,m'}(\tau, f_d)$ 表示发射波形 $s_T^m(t)$ 与 $s_T^{m'}(t)$ 的互模糊函数。对于固定 (τ, f_d) 的情况,互模糊函数 $\chi_{m,m'}(\tau, f_d)$ 与 MIMO 模糊函数 $\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s)$ 的关系类似基于空间频率参数 f_s, f'_s 进行空域匹配滤波。 $|\chi(0, 0, f_s, f'_s)|$ 的值代表无失配的匹配滤波器输出, $|\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s)|$ 越接近于 $\{0, 0, f_s, f'_s\}$ 参数及对应的结果,雷达系统分辨率受阵列波形的影响越小。根据该模糊函数随时延、频移、空间频率的变化可分析雷达基本波形的距离分辨率、多普勒分辨率、空间分辨率及三者之间的相互影响情况。

3 DDMA-LFM 波形 MIMO 模糊函数分析

对于 M 发 L 收的 DDMA-LFM MIMO 雷达系统,发射 M 个不同多普勒频率偏置的 DFS-LFM 信号,推导其 MIMO 模糊函数。根据之前的分析,其模糊函数与接收阵列无关,仅考虑发射波形集及发射阵列。第 m 个发射信号的复包络形式为:

$$s_T^m(t) = \sum_{i=0}^{N-1} c_i^m u(t - i) \quad (9)$$

其中,

$$c_i^m = e^{j2\pi f_b^m i} \quad (10)$$

式中: $1 < m \leq M$, $s_T^m(t)$ 表示第 m 个发射信号, f_b^m 则表征第 m 个发射信号的多普勒偏置频率, N 表示扫频周期的个数。

根据多普勒偏置 LFM 信号的互模糊函数分析,不同多普勒偏置发射信号的互模糊函数中心模糊带的表达式为:

$$\chi_{m,m'}(\tau, f_d) = \chi_u(\tau, f_d) \cdot e^{j\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)\tau N} \cdot \frac{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)N)}{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m))} \quad (11)$$

则其 MIMO 模糊函数为:

$$\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s) = \chi_u(\tau, f_d) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M e^{j\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)\tau N} \cdot \frac{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)N)}{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m))} \cdot e^{j2\pi(f'_s(m'-1) - f_s(m-1))} \quad (12)$$

其中,对于均匀线阵有:

$$f_s = \frac{f_0 d_T \sin\theta}{c}, f'_s = \frac{f_0 d_T \sin\theta'}{c} \quad (13)$$

可以看出,模糊函数 $\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s)$ 等式右边第 1 项为简单 Woodward 模糊函数,仅取决于雷达时间分辨率、多普勒分辨率决定,第 2 项则与 $\{f_d, f_s, f'_s\}$ 相关,与时延差

τ 无关,故而可以认为在空间(角度)和时间(距离)之间存在可分离性,在空间(角度)和多普勒频率(速度)之间存在耦合性。

当目标波束指向已知波束时,即 $f_s = f'_s$, 此时有:

$$\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s) = \chi_u(\tau, f_d) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M (e^{j\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)N}) \cdot \frac{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m)N)}{\sin(\pi(f_d + f_b^{m'} - f_b^m))} \cdot e^{j2\pi f_s(m'-m)\tau} \quad (14)$$

模糊函数的值仍与 f_s 有关,即在不同的方位上不同波形进行不同的空间相位叠加,可能表现出不一样的分辨性能。

雷达系统距离多普勒维匹配滤波器无失配或者两个待分辨目标在距离与多普勒维不可分辨时, $\chi(0, 0, f_s, f'_s)$ 的输出取决于阵列流型与目标空间方位。 $|\chi(0, 0, f_s, f'_s)|$ 的脊越细,角度分辨率越高, $|\chi(\tau, f_d, f_s, f'_s)|$ 越接近 $|\chi(0, 0, f_s, f'_s)|$, 雷达系统的分辨率越高, 则:

$$\chi(0, 0, f_s, f'_s) = \chi_u(0, 0) \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{m'=1}^M e^{j\pi(f_b^{m'} - f_b^m)N} \cdot \frac{\sin(\pi(f_b^{m'} - f_b^m)N)}{\sin(\pi(f_b^{m'} - f_b^m))} \cdot e^{j2\pi(f'_s(m'-1) - f_s(m-1))\tau} \quad (15)$$

4 仿真结果分析

为了分析研究 DDMA-LFM 波形集与阵列相互作用对雷达分辨率的影响,进一步明确集中式 MIMO 体制 HFGWR 系统 DDM-LFM 信号偏置频率的设置,根据以上推导的 MIMO 模糊函数结果进行了仿真。仿真过程中各参数设置如下: LFM 信号带宽 $B = 30$ kHz, 信号时宽为 $T_p = 0.6$ ms, 扫频周期 $T = 3$ ms, 扫频周期数目 $N = 32$, 发射阵列为阵元间隔为半波长的均匀线阵, 发射信号的多普勒频率均匀偏置间隔为 Δf_b 。根据式(12)得到零多普勒时延-方位角的模糊函数切片如图 1 所示,以及根据式(14)得到波束匹配 ($f_s = f'_s$) 时的时延-多普勒频率的模糊函数切片的俯视图,如图 2 所示。可以看出波束指向不同的情况下,零多普勒时延-方位模糊图的时延分辨率仍保持相同,说明 DDMA-LFM 波形的距离分辨率不受空间位置的影响,在不同阵列及目标方位的情况下距离分辨率仍只与信号有效带宽相关;时延-多普勒频率模糊图中心模糊带的自相关峰相同,且与单个信号的时延多普勒分辨率保持一致,而互相关处(多普勒频率 Δf_b 的整数倍,图 2 多普勒频差为 111 Hz、-111 Hz)峰值的大小不同,表明多普勒与空间方位存在一定的耦合。

对于多普勒偏移-方位角的模糊函数切片如图 3 所示,中心自相关峰出现在波束方向,且多普勒分辨率不受影响,角度分辨率同波束形成一样受到方位的一定影响;互相关峰(图 3 中纵轴多普勒频率为 111 Hz、-111 Hz 处的波峰)则偏离了波束方向,出现多普勒-方位耦合,且由于波形的相位叠加在不同的方位角呈现不同的峰值大小。

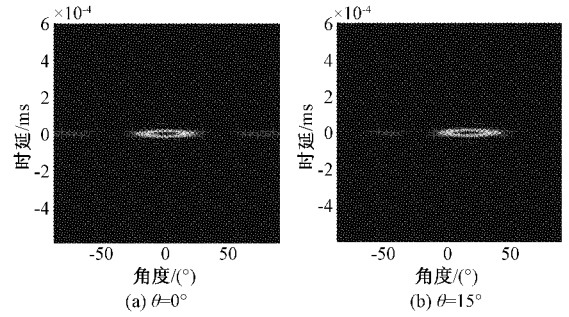


图 1 零多普勒时延-方位的 MIMO 模糊函数切片图

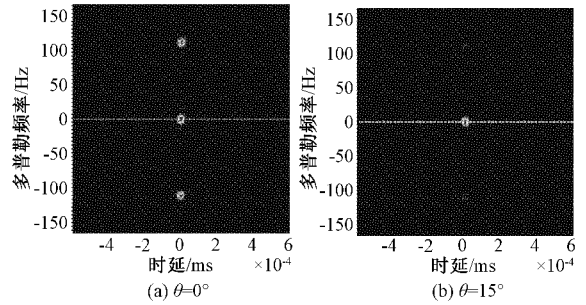


图 2 波束匹配时延-多普勒 MIMO 模糊函数切片图 ($M = 3, \Delta f_b = 111$ Hz)

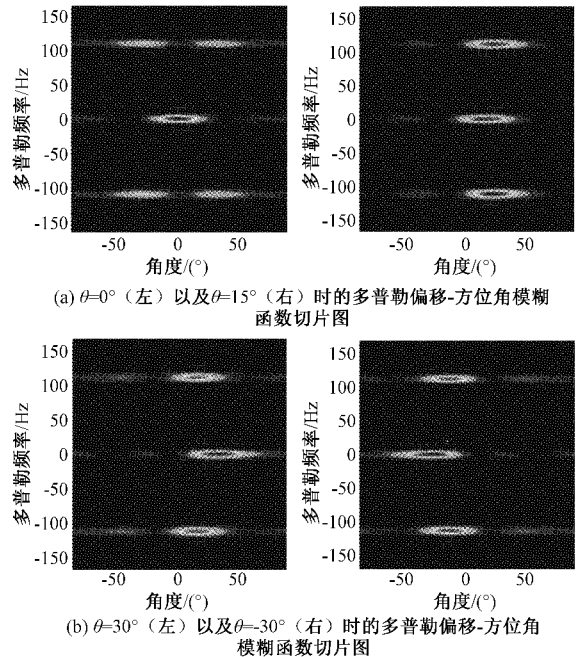


图 3 波束匹配时的方位-多普勒 MIMO 模糊函数切片图 ($M = 3, \Delta f_b = 111$ Hz)

对于距离多普勒维匹配滤波器无失配或者说两个待分辨目标在距离与多普勒维不可分辨的情况, $|\chi(0, 0, f_s, f'_s)|$ 沿直线 $\theta = \theta'$ 呈现一个脊如图 4 所示,即目标波束指向已知波束时两个目标无法分辨;脊峰的位置不在中心,是由于波形多普勒偏置调制的结果,如果没有波形的调制作用,仅由

阵列流型决定,则与波束形成的结果(如图 5 所示)一致,脊峰位于正中心,且呈中心对称。

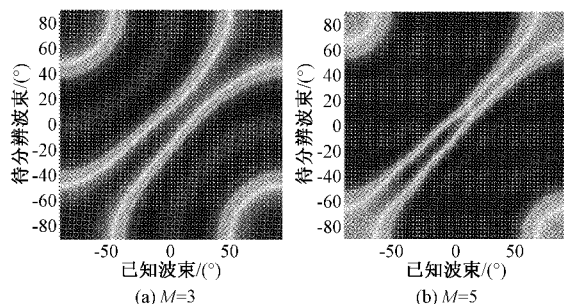


图 4 时延多普勒无失配时的空间 MIMO 模糊函数示意图

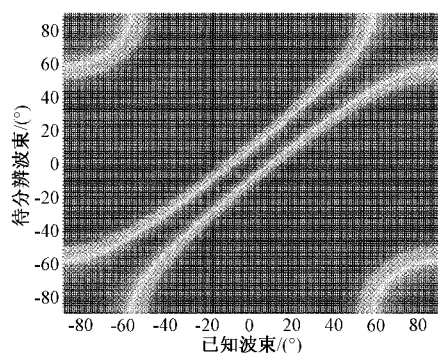


图 5 发射阵列波束形成结果示意图($M=5$)

以 -3 dB 作为衡量角度分辨的指标,观察波形的空间模糊函数 $|\chi(0,0,f,f')|$ 与发射阵列波束形成的 -3 dB 截面如图 6 所示。与波束形成的结果相比,波形的 MIMO 空间模糊函数 -3 dB 截面在某些方位角有一定程度收缩,其角度分辨率有所改善,说明 MIMO 雷达能提高角度分辨率不仅是因为虚拟阵元扩大了阵列口径,发射波形集在空间的相干叠加也有一定贡献。

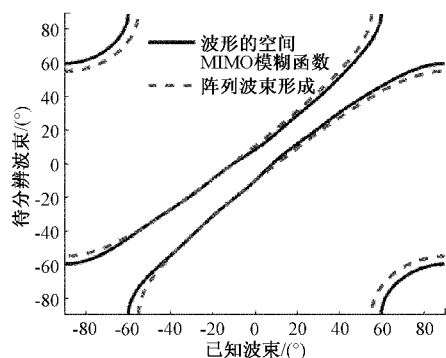


图 6 阵列波束形成与波形空间 MIMO 模糊函数的 -3 dB 截面图($M=5$)

5 结 论

本文基于模糊函数理论,结合 MIMO 阵型参数,进行 DDMA-LFM 波形集的时频空三维的模糊函数分析,分析

其波形集与阵列流型相互作用后同雷达在距离-速度-方位三个维度的探测性能的关系,经过分析得知,其距离(时延)分辨性能与空间方位可独立分离,多普勒频率与空间方位存在相互耦合,但在有效多普勒谱宽内不影响雷达分辨性能,且波形集与阵列相互作用能一定程度上提高某些方位的角度分辨率。其中,MIMO 雷达能提高角度分辨率不仅是因为虚拟阵元扩大了阵列口径,发射波形集在空间的相干叠加也有一定贡献。由于本文工作完全基于理论与仿真,实际中还需对参数进行进一步微小的调整,以满足整点采样、频率精度等硬件系统的要求并经硬件平台仿真、实验系统验证。

参考文献

- [1] LI H, ZHAO Y, CHENG Z, et al. Correlated LFM waveform set design for MIMO radar transmit beam pattern [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(3):329-333.
- [2] HUANG C J, DAI C W, TSAI T Y, et al. FMCW MIMO transceiver for middle-range over-the-horizon radar [C]. IEEE International Conference on Signal Processing, IEEE, 2012.
- [3] 吴昊天, 王兴亮, 李伟. 基于优化多相编码和天线设计的 MIMO STAP 方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14(22):207-211.
- [4] GUOHUA W, CHAOYUN M, JINPING S, et al. Sparse frequency waveform analysis and design based on ambiguity function theory [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2016, 10(4):707-717.
- [5] 周升辉. 多载频 MIMO 高频雷达关键技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] CHANG G, LIU A, YU C, et al. Orthogonal waveform with multiple diversities for MIMO radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11):4462-4476.
- [7] 刘波, 何子述, 王海江. MIMO 雷达中的 DFCW 设计及性能分析 [J]. 电子科技大学学报, 2010(5):688-691.
- [8] YU C, CHANG G, JI Y, et al. DFCW-LFM analysis for MIMO HFGWR [C]. 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), IEEE, 2016.
- [9] 高安勤. 高频雷达相位编码信号距离遮挡特性研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 华枝发, 张兰, 岳显昌, 等. 高频地波雷达无线数据传输系统设计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1):151-158.
- [11] SATYABRATA, GLOVER, WAYNE C. Optimal multicarrier phase-coded waveform design for detection of extended targets [C]. Radar Conference, IEEE, 2013.
- [12] 常广弘, 于长军, 纪永刚, 等. MIMO 高频地波雷达典型正交波形性能评价 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):30-36.

- [13] XIA Y, SONG Z, LU Z, et al. Target detection in low grazing angle with OFDM MIMO radar [J]. Progress In Electromagnetics Research M, 2016, 46: 101-112.
- [14] 李燕, 何怡刚, 尹柏强. LFM 信号 DOA 估计分数阶量纲归一化方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3):448-455.
- [15] 王瑞, 芮国胜, 张洋. 利用张量模型的 MIMO-OFDM 中继系统信道估计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12):246-250.
- [16] 谭子苗, 谢亚楠, 王佳佳, 等. PRF 可变的多功能 MIMO-SAR 的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 25-28.
- [17] SHEN D, ZHOU Y, LIU X, et al. Chaotic discrete frequency coding waveform design for MIMO radar[C]. IEEE International Conference on Computer & Information Technology, IEEE, 2014.
- [18] 李慧. 基于 LFM 信号的 MIMO 雷达发射波形设计方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [19] WANG S, HE Q, HE Z. LFM-based waveform design for cognitive MIMO radar with constrained bandwidth[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014, 2014(1):1-9.
- [20] 常广弘, 于长军, 纪永刚, 等. MIMO 高频地波雷达典型正交波形性能评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(2):30-36.
- [21] 李兆民, 袁伟明. 基于分布式 MIMO 雷达的检测前跟踪算法研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 105-108.
- [22] SEN S, NEHORAI A. OFDM MIMO radar with mutual-information waveform design for low-grazing angle tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(6):3152-3162.
- [23] ZHANG L, WU X, LIU J, et al. Multi-frequency high frequency surface wave radar based on phase offset[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(8):1106-1111.
- [24] HUANG S, TAN K. Design and analysis of fault diagnosis and fault-tolerant control for a class of MIMO nonlinear state systems[J]. Instrumentation, 2019, 6(4):14-25.
- [25] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2012.
- [26] 邹佳龙, 姚元, 王建明. 相控阵 MIMO 雷达最佳子阵数目估算方法[J]. 电子测量技术, 2016(1):65-68.

作者简介

梅慧(通信作者), 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、目标检测跟踪导航。
E-mail: anitamay@126.com