

面向小型无人机的 OFDM-MIMO 雷达信号设计和处理方法

胡念平¹ 田旋旋^{*2}

(1. 陆军特种作战学院指挥系, 广西桂林 541002; 2. 广州航海学院信息与通信工程学院, 广东广州 510725)

摘要: 随着空域的逐渐开放,以小型无人机为代表的低慢小目标,其有效检测对维护安全非常重要。然而,低慢小目标具有飞行高度低、飞行速度慢及雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)小的特点,加之电磁环境复杂多变,使其难以被传统低分辨率雷达发现。为了提升雷达的低截获性能和成像分辨率,本文提出了一种基于步进正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达信号设计和处理方法。该方法是将窄带 OFDM 信号与非线性步进方案相结合,通过非线性步进方案控制 MIMO 发射信号的载频,获得发射端正交波形和大射频频带宽,使得雷达接收机的天线孔径获得明显扩展,从而提升雷达的低截获性能和角度分辨率,同时实现低采样速率下的高距离分辨率。在雷达接收端,利用发射波形之间的正交性分离各通道回波,然后基于改进离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)和解码的处理方法,校正了非线性步进方案产生的相位误差,生成目标的三维高分辨成像。本文在 77 GHz 载频下设计仿真,验证所提方法的有效性。仿真结果表明,所提方法相比现有方法,在低信噪比下具有较高的三维成像分辨率,而且没有明显增加信号处理的复杂度。然而,该方法减小了最大无模糊速度。此外,本文讨论了步长数对雷达性能的影响,仿真结果表明,随着步长数的增加,最大无模糊速度减小,角度分辨率提升,为实际应用场景下步进 OFDM-MIMO 雷达的信号设计提供理论指导。

关键词: 多输入多输出雷达; 正交频分复用; 小型无人机; 三维高分辨成像; 非线性步进方案

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.05.007

引用格式: 胡念平,田旋旋.面向小型无人机的 OFDM-MIMO 雷达信号设计和处理方法[J].信号处理,2024,40(5): 878-886. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.05.007.

Reference format: HU Nianping, TIAN Xuanxuan. Signal design and processing method of OFDM-MIMO radar for small UAVs[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(5): 878-886. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2024.05.007.

Signal Design and Processing Method of OFDM-MIMO Radar for Small UAVs

HU Nianping¹ TIAN Xuanxuan^{*2}

(1. Department of Command, Special Operation College of PLA, Guilin, Guangxi 541002, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou, Guangdong 510725, China)

Abstract: With the gradual opening of airspace, the effective monitoring of low slow small (LSS) targets represented by small unmanned aerial vehicles (UAVs) is important to maintain security. Detecting these targets using conventional low-resolution radars is challenging due to their low altitude, slow speed, and small radar cross section (RCS), particu-

收稿日期: 2024-01-09; 修回日期: 2024-03-16

*通信作者: 田旋旋 tianxuanxuan2023@163.com *Corresponding Author: TIAN Xuanxuan, tianxuanxuan2023@163.com

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515011272)

Foundation Item: Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515011272)

larly in complex and changeable electromagnetic environments. To improve radar interception performance and image resolution, we propose a signal design and processing approach for multiple input multiple output (MIMO) radar that employs stepped orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) to detect small UAVs. First, the proposed waveform is designed by combining OFDM signals of small bandwidth with a nonlinear stepping scheme, denoted as stepped OFDM, which enables the transmission of consecutive low-bandwidth OFDM symbols on different carrier frequencies, thereby covering a much larger radio frequency (RF) bandwidth in a measurement frame. This also enables the high range resolution at a lower sampling rate compared to an equivalent wideband OFDM. In addition, the multiplexing of transmit (TX) antennas for the MIMO can be performed using stepped OFDM signals, which enables multiple TX antennas to operate simultaneously by assigning orthogonal subcarrier sets to each antenna, increasing the degrees of freedoms (DOFs) on both transmitters and receivers, eventually leading to a virtual array at receivers that significantly increase the antenna aperture size. Consequently, the stepped OFDM MIMO radar improves the azimuth resolution and low intercept performance. Then, the echoes of each channel are separated by utilizing the orthogonality between the transmit signals in the receiver. Additionally, a radar signal processing method to the stepped OFDM MIMO radar is proposed to improve the image resolution, where the modified discrete Fourier transform (DFT) and decoding processing is used to correct the phase errors introduced by the nonlinear stepping scheme, leading to separate range-velocity images for each virtual channel. In addition, the azimuth estimation exploiting the extended virtual array of the stepped OFDM MIMO radar is achieved by performing Fourier beamforming. Consequently, three dimensional (3D) high-resolution images of targets can be generated. Finally, the effectiveness of the proposed method is validated via simulations performed at a carrier frequency of 77 GHz. Notably, compared to the existing methods, the proposed method can achieve higher resolution in range, velocity, and azimuth dimensions in a low signal-to-noise ratio (SNR) regime and without increasing the more computational complexity of signal processing. However, high resolution is achieved at the expense of a reduced maximum unambiguous velocity. In addition, the effect of the number of steps on radar performance is examined. Results indicate that when the measuring time and the total RF bandwidth are the same, the maximum unambiguous velocity is decreased by the number of steps, and the achievable azimuth resolution is improved by the number of steps. Thus, this study can provide theoretical guidance for the signal design of stepped OFDM MIMO radars in practical application scenarios.

Key words: multiple input multiple output radar; orthogonal frequency division multiplexing; small UAVs; three-dimensional high-resolution imaging; nonlinear stepping scheme

1 引言

近年来,小型无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)因其低成本和灵活性,在侦查监视、航拍、环境检测和灾害救援等方面得到广泛应用^[1]。然而,随着小型无人机数量的增加,城市低空安全受到严峻挑战。小型无人机黑飞事件不断发生,严重危害飞行起降、要地防护等,迫切需要研究有效的无人机目标探测技术^[2]。小型无人机是典型的低慢小(Low Slow Small, LSS)目标,具有飞行高度低、飞行速度慢以及雷达反射截面积(Radar Cross Section, RCS)小的特点,使其在日益复杂的电磁环境中不易被传统低分辨雷达探测^[3]。因此,探测低慢小目标对雷达系统的抗截获性能、成像分辨率提出了更高要求。

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达因其空间分集和波形分集特性,拓展天线阵列孔径,增强空间自由度,具有杂波抑制能力

强、角度分辨率高、低截获概率等优势^[4]。然而,MIMO雷达这些优势的前提是发射波形具有正交特性。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM)是现代通信中常用的一种多载频传输技术,通过子载频间的正交性实现频率分集,具有时宽带宽积大、参数设计灵活、抗截获性能好等优点^[5]。将OFDM与MIMO雷达结合^[6-9],兼具上述优势,近年来在低慢小目标探测上受到广泛关注。

文献[10]提出了一种基于子载频交错OFDM(Interleaved OFDM, I-OFDM)信号的MIMO雷达系统,并基于三维离散傅里叶变换(Discrete Fourier Transform, DFT)方法获得无人机的三维距离、速度和角度像。然而,这种方法降低了最大无模糊距离。文献[11]改进了I-OFDM信号,对OFDM子载频序列进行随机非均匀的稀疏,利用压缩感知的方法实现目标三维成像,解决了距离模糊问题,但是具有较高的计算复杂度。文献[12]将OFDM和线

性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)相结合应用于MIMO雷达,接收机通过匹配滤波分离各发射通道的回波信号,并采用参差补偿算法来抑制多径和杂波干扰,但此方法适用于高速和小RCS目标。文献[13]提出了一种基于编码OFDM的MIMO正交信号,通过优化编码获得具有良好自相关和互相关特性的波形集。文献[14]在MIMO雷达中将OFDM与调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)调制相结合,基于二维DFT进行距离和速度估计。然而,所提方法存在距离-速度耦合问题,降低了成像分辨率。文献[15]提出了一种基于频率梳OFDM的MIMO雷达信号,将窄带OFDM与发射频率梳相乘,基于二维DFT实现低采样速率下的高分辨距离和速度像。在文献[15]的基础上,文献[16]提出一种随机频率梳OFDM信号,采用压缩感知方法实现高精度的距离估计。文献[17]研究了基于步进OFDM信号的MIMO雷达系统,基于三维DFT实现目标参数估计,但未给出详细的数学描述。文献[18]提出一种步进OFDM信号,基于改进DFT实现高分辨的距离和速度估计。然而,由于步进产生的载频序列规律性强,易被干扰机掌握,抗截获性能较低。

基于以上分析,为了同时提升雷达的低截获性能和成像分辨率,本文提出了一种基于步进OFDM的MIMO雷达信号设计和处理方法。该方法对文献[18]中的步进OFDM信号进行改进,将窄带OFDM与非线性步进方案相结合,获取MIMO发射端正交波形和合成大射频带宽,同时提升雷达的低截获性能、角度分辨率和距离分辨率,而且没有增加采样率。并基于改进DFT和解码的处理方法,获取目标的三维高分辨成像。

本文的主要内容安排如下:第2节建立了MIMO雷达信号模型;第3节介绍了所提的雷达信号处理方法;第4节仿真分析了所提方法的有效性;第5节对本文所提方法进行了总结。

2 MIMO 雷达信号模型

2.1 发射信号

本文考虑如图1所示的基于小型无人机检测的车载MIMO雷达系统,其收发阵列共址,均为均匀线阵,发射阵元个数为 P ,接收阵元个数为 Q 。阵列间隔为 $d = \lambda/2$, λ 为信号波长。每个阵元发射步进OFDM信号,接收阵元接收目标散射的回波,用于估计目标的距离、速度和角度信息。同时,车载

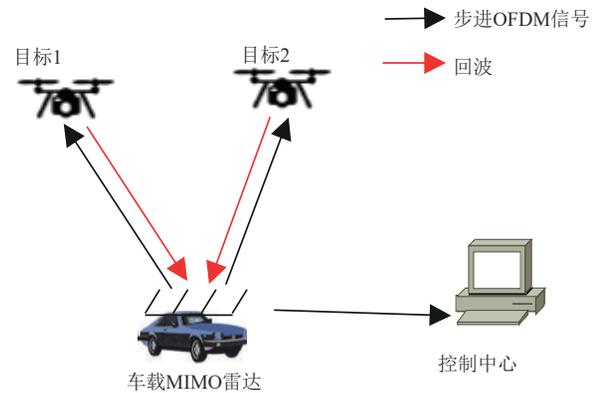


图1 用于小型无人机检测的车载MIMO雷达系统模型
Fig. 1 System model of vehicle-mounted MIMO radar for small UAV detection

MIMO雷达通过步进OFDM信号将目标检测信息传递给控制中心,从而实现对小型无人机的实时检测和跟踪。

针对如图1所示的小型无人机检测场景,本文所设计的MIMO雷达第 p 个阵元发射步进OFDM信号的时频结构如图2所示。该信号是将传统OFDM信号分成 B 块,其中,每块包含 M 个OFDM子符号,每个子符号包含 N 个子载频。

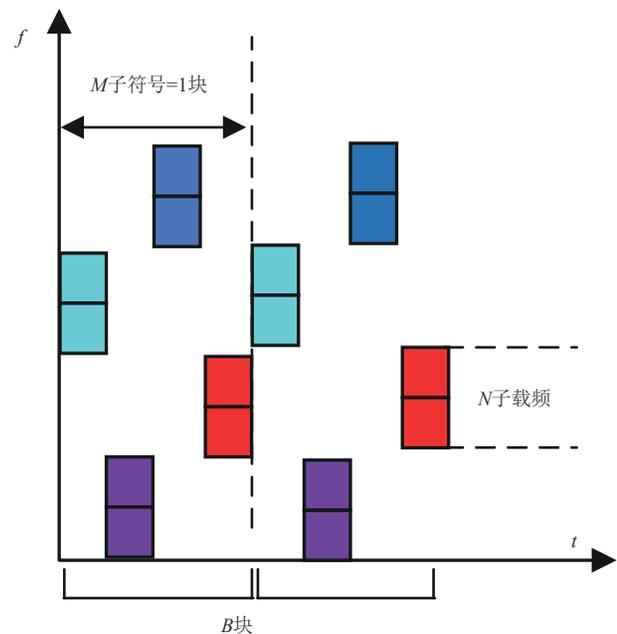


图2 步进OFDM信号的时频关系图
Fig. 2 Time-frequency structure of stepped OFDM signals

由图2所示信号的时频关系图可知,第 p 个阵元发射的步进OFDM信号为

$$x_p(t) = \sum_{b=0}^{B-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_p(n, m, b) \exp\left[j2\pi(f_{m,p} + n\Delta f)t\right] \operatorname{rect}\left(\frac{t - mT_{\text{sym}} - bMT_{\text{sym}}}{T_{\text{sym}}}\right) \quad (1)$$

式中, $A_p(n, m, b)$ 是第 p 个阵元的第 b 块第 m 个子符号第 n 个子载频调制的通信信息, $T_{\text{sym}} = T + T_g$ 表示一个完整 OFDM 符号周期, 其中, $T = 1/\Delta f$ 为有效 OFDM 符号周期, Δf 为子载频间隔, T_g 为循环前缀的周期, $\operatorname{rect}(t/T_{\text{sym}})$ 为单位矩形窗函数, 当 $0 < t < T_{\text{sym}}$ 时为 1, 否则为 0. $f_{m,p}$ 表示第 p 个阵元的第 m 个子符号的载频。

在[18]中, $f_{m,p}$ 遵循线性模式。本文定义一个随机向量 c_p , 使 $f_{m,p}$ 遵循非线性模式, 表达式为

$$f_{m,p} = f_0 + c_p[m]B_0 \quad (2)$$

式中, f_0 为 MIMO 雷达的起始频率, $B_0 = N\Delta f$ 为子符号的基带带宽, 则合成的射频带宽为 $B_{\text{RF}} = MN\Delta f$. $c_p[m]$ 为第 p 个阵元的第 m 个子符号的步进索引, 且有 $c_p[m] \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ 。

本文通过步进索引控制 MIMO 天线的载频, 构造发射端正交波形。例如, 步进 OFDM-MIMO 雷达参数设为 $N=2, M=4, B=2, P=4, c_0=[3, 1, 0, 2], c_1=[2, 0, 3, 1], c_2=[1, 3, 2, 0], c_3=[0, 2, 1, 3]$ 。此外, 为了构造发射端正交波形, 本文发射阵元个数 P 要求不大于步长数 M , 即 $P \leq M$ 。

基于以上分析, 在低慢小目标探测上步进 OFDM-MIMO 性能优于传统 OFDM-MIMO。首先, 窄带 OFDM 结合非线性步进方案, 使各阵元发射信号相互正交, 能够获得 $S = P \times Q$ 阵元的虚拟阵列。在接收端依赖正交性分离各发射阵元的回波信号, 从而提高角度分辨率和低截获能力。其次, 步进 OFDM 信号以小基带带宽合成大射频带宽, 具备低采样速率下的高距离分辨率, 克服了因大带宽带来的硬件成本限制。

2.2 接收信号

第 p 个阵元发射步进 OFDM 信号, 经过单个散射点散射, 第 q 个阵元接收的回波与第 p 个阵元的载频进行下变频, 则第 q 个阵元接收的来自第 p 个阵元的基带回波可表示为

$$y_{q,p}(t) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) x_p\left(t - \frac{2(r-vt)}{c}\right) \exp(-j2\pi f_{m,p}t) \quad (3)$$

式中, $\varphi_{q,p} = 2\pi(q+p)d\sin\theta/\lambda$ 表示第 $(p+q)$ 个虚拟阵元相对参考阵元的相位延时, ρ 和 θ 分别表示目标的散射系数和到达角, r 和 v 分别为目标相对雷达的

初始距离和速度, c 为光速。将式(1)代入式(3)可得

$$y_{q,p}(t) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) \sum_{b=0}^{B-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_p(n, m, b) \exp(j2\pi n\Delta f t) \exp\left[-j2\pi \frac{2r}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)t\right] \exp\left[j2\pi \frac{2vt}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \quad (4)$$

接收机以 $f_s = N/T$ 对回波信号进行采样。该采样速率等于基带带宽, 而不是射频带宽, 因此降低了系统采样率。经采样和去循环前缀, 式(4)的离散形式可以表示为

$$y_{q,p}(i, m, b) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) \sum_{n=0}^{N-1} A_p(n, m, b) \exp\left(j2\pi \frac{in}{N}\right) \exp\left[-j2\pi \frac{2r}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \times \exp\left[j2\pi \frac{2vT(m+bM)}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \quad i \in [0, N-1], m \in [0, M-1], b \in [0, B-1] \quad (5)$$

3 雷达信号处理方法

3.1 速度像估计

首先, 为了获得每个子载波的频域信号, 对式(5) $y_{q,p}(i, m, b)$ 关于 i 作 DFT, 可得

$$Y_{q,p}(n, m, b) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) A_p(n, m, b) \exp\left[-j2\pi \frac{2r}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \exp\left[j2\pi \frac{2vT(m+bM)}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \quad n \in [0, N-1], m \in [0, M-1], b \in [0, B-1] \quad (6)$$

然后, 为了消除发射端通信信息的影响进行矩阵相除, 可得

$$D_{q,p}(n, m, b) = \frac{Y_{q,p}(n, m, b)}{A_p(n, m, b)} = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) \exp\left[-j2\pi \frac{2r}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \exp\left[j2\pi \frac{2vT(m+bM)}{c}(f_{m,p} + n\Delta f)\right] \quad (7)$$

传统多普勒处理方法是对式(7) $D_{q,p}(n, m, b)$ 关于 b 作 DFT, 获得目标速度像, 表达式为

$$V_{q,p}(n, m, k) = \sum_{b=0}^{B-1} D_{q,p}(n, m, b) \exp\left(-j2\pi \frac{kb}{B}\right) \quad k \in [0, B-1] \quad (8)$$

联合式(7)和式(8)可得, 当满足以下条件

$$\exp\left[j2\pi\frac{2vT(m+bM)}{c}(f_{m,p}+n\Delta f)\right] \exp\left(-j2\pi\frac{kb}{B}\right) = 1 \quad (9)$$

时,得到目标速度单元索引

$$k = \frac{2v(m+bM)BT}{cb}(f_{m,p}+n\Delta f) \approx \frac{2v(m+bM)BT}{cb}f_0 \quad (10)$$

在式(10)中,满足 $f_0 \gg MN\Delta f$ 。由式(10)可以看出,目标速度单元索引随着步进索引 m 的变化而变化,也就是说,对步进OFDM信号进行速度维DFT处理,速度像中不会出现尖锐的峰值,导致无法进行正确的速度估计,进而降低距离像和角度像的分辨率。这是由于非线性步进方案产生的相位误差

$$\Delta\phi_m = \exp\left[j2\pi\frac{2vmT}{c}(f_{m,p}+n\Delta f)\right] \approx \exp\left(j2\pi\frac{2vmT}{c}f_0\right) \quad (11)$$

影响速度维DFT处理,为此本文将对其进行相位误差校正。

文献[18]提出了一种基于步进OFDM信号的相位误差校正方法,同样适用于本文的信号模型。该方法是对式(7) $\mathbf{D}_{q,p}(n, m, b)$ 关于 b 作改进DFT,表达式为

$$V_{q,p}(n, m, k) = \sum_{b=0}^{B-1} \mathbf{D}_{q,p}(n, m, b) \exp\left[-j2\pi\frac{k(m+bM)}{MB}\right] \quad k \in [0, B-1] \quad (12)$$

当

$$\exp\left[j2\pi\frac{2vT(m+bM)}{c}(f_{m,p}+n\Delta f)\right] \exp\left[-j2\pi\frac{k(m+bM)}{MB}\right] = 1 \quad (13)$$

时,得到目标速度单元索引

$$k = \frac{2vMBT}{c}(f_{m,p}+n\Delta f) \approx \frac{2vMBT}{c}f_0 \quad (14)$$

对比式(10)和(14)可得,改进DFT校正了步进方案产生的相位误差,从而得到准确的速度估计。由式(14)可得,目标速度分辨率和最大无模糊速度分别为

$$\Delta V = \frac{c}{4f_0MBT} \quad (15)$$

$$V_{\max} = \pm \frac{c}{4f_0MT} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可以看出,相比传统OFDM,步进OFDM的速度分辨率不变,然而最大无模糊速度减小了 M 倍。

3.2 距离像估计

经过改进DFT处理后,式(12)变为

$$V_{q,p}(n, m, k) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) \exp\left[-j2\pi\frac{2r}{c}(f_{m,p}+n\Delta f)\right] \delta(k-k_0) \quad (17)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数, k_0 为目标速度单元索引。

在式(17)中,每个阵元的载频 $f_{m,p}$ 遵循非线性模式,导致相邻子载频间的相位是非线性的。为了使 $f_{m,p}$ 遵循线性模式,接下来将进行解码处理。

图3给出了第 p 个阵元步进OFDM信号的解码原理,其中引入逆步进向量 $\mathbf{c}_{-1,p}$ 。为了重新排列每块的子符号,并使得每个子符号的载频线性增加,必须使 $\mathbf{c}_{-1,p}$ 与正确的载频相关联,即 $\mathbf{c}_{-1,p}[m]$ 对应第 p 个阵元的第 m 个子符号的载频 $f_0 + mN\Delta f$ 。

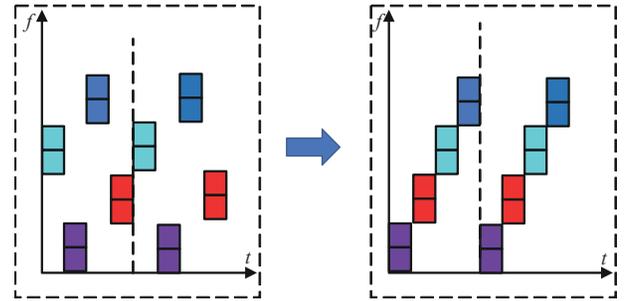


图3 步进向量 $\mathbf{c}_p = [2, 0, 3, 1]$ 和逆步进向量 $\mathbf{c}_{-1,p} = [1, 3, 0, 2]$

Fig. 3 Steps vector $\mathbf{c}_p = [2, 0, 3, 1]$ and inverse steps vector $\mathbf{c}_{-1,p} = [1, 3, 0, 2]$

基于以上解码处理,在式(17)中用 $\mathbf{c}_{-1,p}[m]$ 替换 $\mathbf{c}_p[m]$,可得

$$V_{q,p}(n, m, k) = \rho \exp(j\varphi_{q,p}) \exp\left[-j2\pi\frac{2r}{c}(f_0 + (mN+n)\Delta f)\right] \delta(k-k_0) \quad (18)$$

在式(18)中,定义 $\eta = mN + n$,有 $V_{q,p}(\eta, k) = V_{q,p}(mN + n, k)$ 。对 $V_{q,p}(\eta, k)$ 关于 η 作离散傅里叶逆变换(Inverse DFT, IDFT),得到目标距离像,表达式为

$$\mathbf{R}_{q,p}(u, k) = \sum_{\eta=0}^{MN-1} V_{q,p}(\eta, k) \exp\left(j2\pi\frac{u\eta}{MN}\right) \quad u \in [0, MN-1] \quad (19)$$

从而可得目标距离单元索引为

$$u = \frac{2rMNAf}{c} \quad (20)$$

3.3 角度像估计

MIMO 接收端由于发射波形的正交性, 可以得到 $S=P \times Q$ 阵元的虚拟阵列, 虚拟阵列阵元间隔为 $\lambda/2$ 。则虚拟阵列的接收导向矢量为

$$\mathbf{B}(\phi) = \left[1, \exp\left(j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right), \dots, \exp\left(j2\pi(S-1) \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right) \right] \in \mathbb{C}^{1 \times S} \quad (21)$$

把所有虚拟阵元对应式(19)的输出按顺序排列, 可得

$$\mathbf{G}(u, k) = [\mathbf{R}_{0,0}(u, k), \mathbf{R}_{1,0}(u, k), \dots, \mathbf{R}_{Q-1,P-1}(u, k)] \quad (22)$$

在式(22)中, 定义 $s = q + p$, 有 $\mathbf{G}_s(u, k) = \mathbf{G}_{q+p}(u, k) = \mathbf{R}_{q,p}(u, k), 0 \leq q \leq Q-1, 0 \leq p \leq P-1$ 。则所有虚拟阵元经过以上速度像和距离像处理, 得到

$$\mathbf{I}(u, k, \theta) = \sum_{s=0}^{S-1} \mathbf{G}_s(u, k) \exp\left(j2\pi s \frac{d}{\lambda} \sin \theta\right) \quad (23)$$

在式(23)中, 对 s 作 DFT 可获取目标的角度像, 从而实现目标距离、速度、角度的联合估计。

4 仿真结果与分析

仿真验证本文所提步进 OFDM-MIMO 雷达的成像性能, 并与传统三维 DFT 方法进行性能比较^[10]。参数设置如表 1 所示, 其中, 收发阵元个数相同, 且等于步长数。在距离、速度和角度维上分别加汉明窗抑制旁瓣, 信道模型为高斯白噪声信道。

4.1 性能比较

首先, 仿真分析所提算法下雷达三维成像性

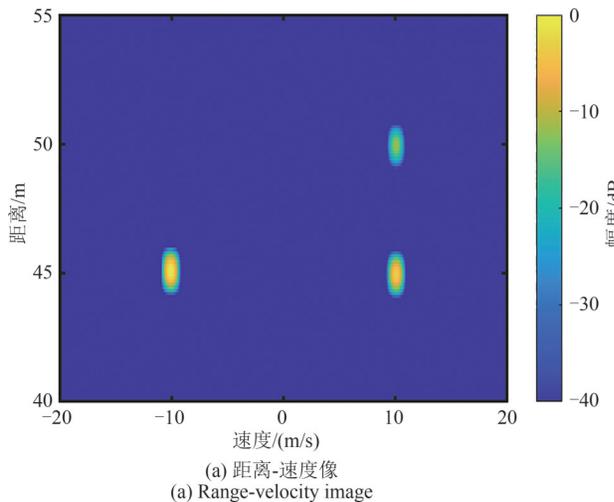


表 1 仿真参数
Tab. 1 Simulation parameters

参数	参数值
子符号(步长)数	8
子载波数	256
块数	256
发射/接收阵元个数	8
起始载频/GHz	23.7
基带带宽/MHz	38.4
有效 OFDM 符号持续时间/ μ s	6.67
循环前缀时间/ μ s	1.67
最大无模糊距离/m	1000
距离分辨率/m	0.49
最大无模糊速度/(m/s)	± 59.34
速度分辨率/(m/s)	0.46

能。仿真目标数为 3, 离雷达径向距离依次为 45 m, 45 m, 50 m; 径向速度依次为 -10 m/s, 10 m/s, 10 m/s; RCS 分别为 $1 \text{ m}^2, 0.5 \text{ m}^2, 0.1 \text{ m}^2$; 到达角分别为 $20^\circ, 30^\circ, 30^\circ$; 信噪比均为 0 dB。所提方法和传统三维 DFT 方法下三个散射点的成像结果如图 4 和图 5 所示。

对比图 4 和图 5 可得, 所提方法能够分辨出三个目标, 且距离维上旁瓣幅度较小。因此, 所提方法可以估计出所有目标的距离、角度和散射系数, 实现多个目标的分辨, 且具有较高的分辨率。然而, 传统三维 DFT 方法无法分辨所有的目标, 在距离维上产生高旁瓣, 这些高旁瓣会遮盖 RCS 为 0.1 m^2 的弱目标。这些距离高旁瓣来自于非线性步进方案和目标运动产生的相位偏移, 从而降低雷达成像的

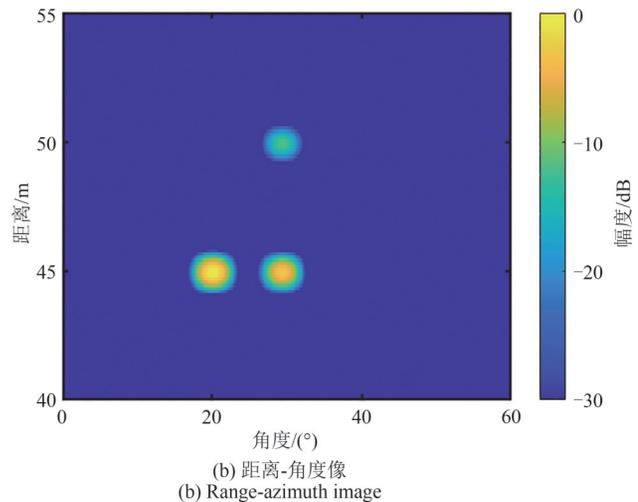


图 4 所提方法三个目标的成像结果

Fig. 4 Imaging results of the three targets using the proposed method

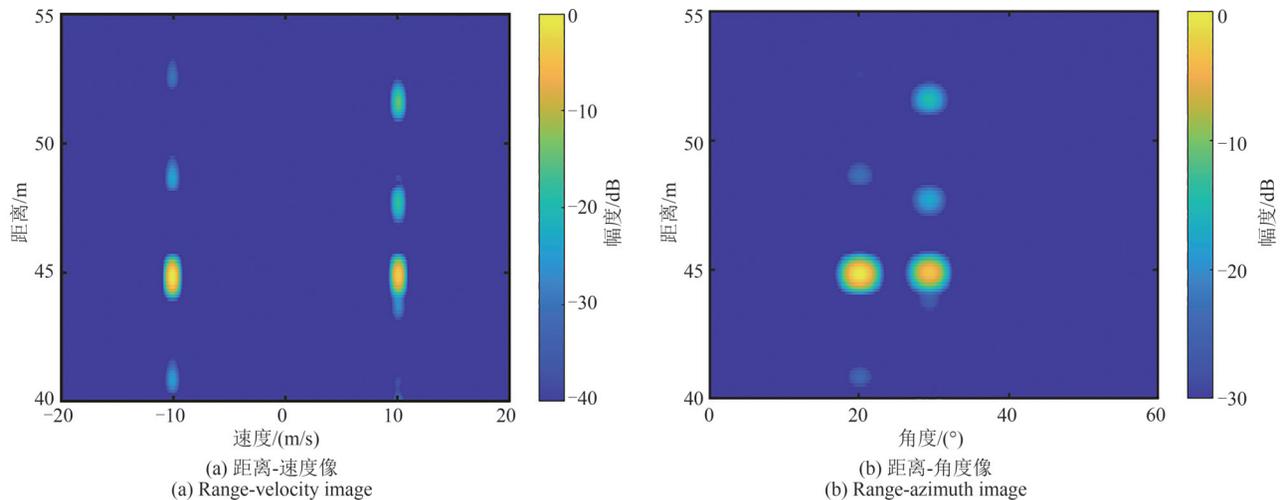


图5 三维DFT方法三个目标的成像结果

Fig. 5 Imaging results of the three targets using the three-dimensional DFT method

分辨率。而所提方法基于改进DFT和解码处理进行了相位误差校正,从而可以获得高分辨率的距离、速度和角度像。

下面分析所提算法目标距离像峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)随信噪比的变化情况,并与文献[18]算法、文献[19]算法和三维DFT算法进行对比。信号参数设置与以上仿真一致,进行1000次蒙特卡洛试验,仿真结果如图6所示。可以看出,对比其他三种算法,所提算法在目标距离像上具有较大的PSLR,且随着SNR的增加而增大。在SNR=-8 dB时,相比文献[19]算法,其PSLR提升了约4.7 dB,这表明所提算法能够获取低信噪比条件下

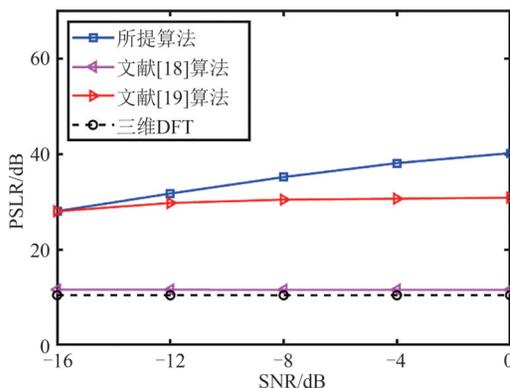


图6 不同算法下距离像PSLR随信噪比的变化情况

Fig. 6 PSLR of the range profile for different SNRs using different algorithms

的高分辨目标距离像。这是由于文献[18]算法采用改进DFT处理,文献[19]算法采用标准DFT和解码处理,传统三维DFT采用标准DFT处理,都没有完全

补偿非线性步进和目标运动产生的相位偏移。仿真结果验证了所提算法的有效性和可靠性。

此外,在上述信号参数条件下,对不同方法的总运算时间进行了统计对比,基于本仿真平台,运行1000次的平均时间如表2所示。可以看出,本文所提算法具有较大的运行时间。然而,所提算法利用改进DFT和解码处理,获取较高分辨率的同时,计算复杂度并没有明显增加。而且随着现代超级计算机运算性能的急速提升,复杂度并非首要考虑的因素。

表2 运行时间分析

Tab. 2 Runtime analysis

算法	运行时间/s
所提算法	14.02
文献[18]算法	13.89
文献[19]算法	13.42
三维DFT	13.30

4.2 步长数对雷达性能的影响

在保持射频带宽和测量时间不变的情况下,分析步长数对雷达性能的影响。首先,步长增大,基带带宽减小,采样速率降低。这是因为采样速率等于基带带宽。接下来分析步长数对雷达距离、速度和角度像的影响。

目标参数设为 $r=45$ m, $v=10$ m/s 和 $\theta=30^\circ$ 。不同步长下单个目标的成像结果如图7所示。由图7(a)可知,不同步长下的距离像主瓣宽度相同,其分辨率几乎相同。这是由于射频带宽相同,导致距离像分辨率相同。由图7(b)可知, $M=16$ 对应的角度像

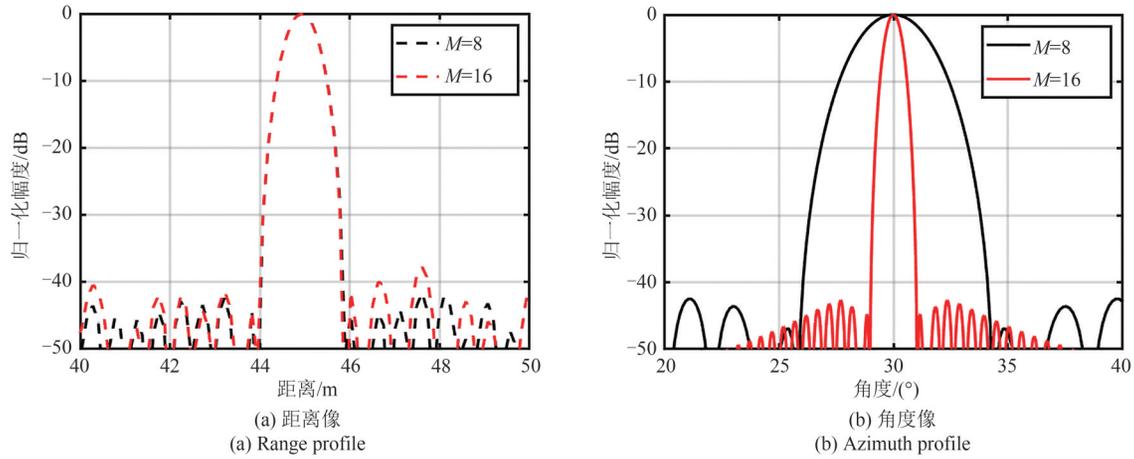


图 7 不同步长下单个目标的成像结果

Fig. 7 Imaging results of a single target using different steps

其主瓣宽度明显变窄。这是由于增加步长数目,改善了角度分辨率。

根据式(16)可得,增大步长数目,会降低最大无模糊速度。当 $M=16$ 时,最大无模糊速度为 $V_{\max} = \pm 29.67 \text{ m/s}$ 。如果图 7 中目标速度增大至 $v=40 \text{ m/s}$,其成像结果如图 8 所示。可以看到在距离维上出现高旁瓣,且目标速度估计错误,其估计值为 -19.06 m/s 。这是由于 $v > V_{\max}$,出现了速度模糊问题。

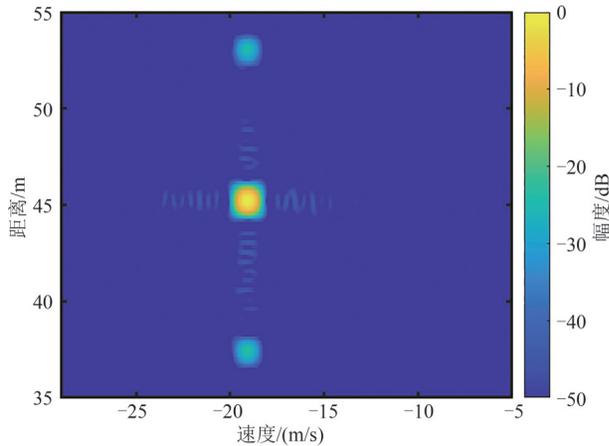


图 8 单个目标 $r=45 \text{ m}$, $v=40 \text{ m/s}$ 的距离-速度像

Fig. 8 Range-velocity image of a single target with $r=45 \text{ m}$ and $v = 40 \text{ m/s}$

基于以上分析,对于步进 OFDM-MIMO 雷达,在射频带宽和测量时间不变的情况下,增加步长数 M ,采样速率降低,距离分辨率不变,角度分辨率提升,最大无模糊速度降低。此外,由于低慢小目标的速度较小,故可认为不需要很大的无模糊速度。针对图 8 出现的速度模糊问题,如果 $M=8$ 就不会出现速度模糊。

因此,根据实际应用场景,综合考虑上述性能指标进行步进 OFDM-MIMO 雷达信号参数设置。

5 结论

为了提升雷达的低截获性能和小型无人机目标的成像分辨率,本文设计了基于步进 OFDM 的 MIMO 雷达信号设计和处理方法。该信号通过结合窄带 OFDM 与非线性步进方案,构造发射端正交波形和合成大射频带宽,同时提升雷达的低截获性能、角度分辨率和距离分辨率。采用基于改进 DFT 和解码的处理方法,校正非线性步进方案和目标运动产生的相位误差,有效地实现阵列孔径的倍增。仿真结果表明:相比现有算法,本文所提方法能够提升低信噪比条件下目标的成像分辨率,且没有明显增加信号处理的复杂度。此外,在保持射频带宽和测量时间不变的情况下,增加步长数,会降低采样速率,距离分辨率不变,提升角度分辨率,降低最大无模糊速度。因此,如何增大最大无模糊速度是步进 OFDM-MIMO 雷达未来进一步研究的方向。

参考文献

- [1] KANG Honggu, JOUNG J, KIM J, et al. Protect your sky: a survey of counter unmanned aerial vehicle systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 168671-168710.
- [2] WELLIG P, SPEIRS P, SCHUEPBACH C, et al. Radar systems and challenges for C-UAV [C]//2018 19th International Radar Symposium (IRS). Bonn, Germany. IEEE, 2018: 1-8.
- [3] 陈小龙, 陈唯实, 饶云华, 等. 飞鸟与无人机目标雷达探测与识别技术进展与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 803-827.

- CHEN Xiaolong, CHEN Weishi, RAO Yunhua, et al. Progress and prospects of radar target detection and recognition technology for flying birds and unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 803-827. (in Chinese)
- [4] 黄磊, 柳艾飞, 高才才. 集中式MIMO雷达研究进展: 正交波形设计与信号处理[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(1): 1-15, 23.
HUANG Lei, LIU Aifei, GAO Caicai. A review of orthogonal waveform design and signal processing in colocated MIMO radar[J]. Radar Science and Technology, 2023, 21(1): 1-15, 23. (in Chinese)
- [5] 王舒玉, 马智杰, 张天贤, 等. OFDM雷达信号联合优化设计与处理方法[J]. 信号处理, 2022, 38(11): 2299-2307.
WANG Shuyu, MA Zhijie, ZHANG Tianxian, et al. Joint optimization method of OFDM radar signal design and processing[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(11): 2299-2307. (in Chinese)
- [6] YANG Fawei, XU Feng, FIORANELLI F, et al. Practical investigation of a MIMO radar system capabilities for small drones detection [J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2021, 15(7): 760-774.
- [7] KLARE J, BIALLOWONS O, CERUTTI-MAORI D. UAV detection with MIMO radar[C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS). Prague, Czech Republic. IEEE, 2017: 1-8.
- [8] WANG Cheng, LI Zheng, ZHANG Xiaofei. FDA-MIMO for joint angle and range estimation: unfolded coprime framework and parameter estimation algorithm[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(6): 917-926.
- [9] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于OFDM-LFM信号的MIMO雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801-808.
LIU Bingfan, CHEN Baixiao. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 801-808. (in Chinese)
- [10] NUSS B, SIT L, FENNEL M, et al. MIMO OFDM radar system for drone detection [C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS). Prague, Czech Republic. IEEE, 2017: 1-9.
- [11] KNILL C, ROOS F, SCHWEIZER B, et al. Random multiplexing for an MIMO-OFDM radar with compressed sensing-based reconstruction [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2019, 29(4): 300-302.
- [12] 周豪, 胡国平, 师俊朋, 等. OFDM-MIMO雷达低空目标探测性能研究[J]. 电波科学学报, 2016, 31(5): 988-995.
ZHOU Hao, HU Guoping, SHI Junpeng, et al. Low altitude target detection performance for OFDM-MIMO radar [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2016, 31(5): 988-995. (in Chinese)
- [13] KNILL C, EMBACHER F, SCHWEIZER B, et al. Coded OFDM waveforms for MIMO radars[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8769-8780.
- [14] SCHINDLER D, SCHWEIZER B, KNILL C, et al. MIMO-OFDM radar using a linear frequency modulated carrier to reduce sampling requirements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(7): 3511-3520.
- [15] NUSS B, GIROTO DE OLIVEIRA L, ZWICK T. Frequency comb MIMO OFDM radar demonstrator with high unambiguous velocity [J]. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2023, 15(6): 957-965.
- [16] NUSS B, DE OLIVEIRA L G, ZWICK T. Frequency comb MIMO OFDM radar with nonequidistant subcarrier interleaving [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(12): 1209-1212.
- [17] PFEFFER C, FEGER R, STELZER A. A stepped-carrier 77-GHz OFDM MIMO radar system with 4 GHz bandwidth [C]//2015 European Radar Conference (EuRAD). Paris, France. IEEE, 2015: 97-100.
- [18] SCHWEIZER B, KNILL C, SCHINDLER D, et al. Stepped-carrier OFDM-radar processing scheme to retrieve high-resolution range-velocity profile at low sampling rate [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66(3): 1610-1618.
- [19] LELLOUCH G, MISHRA A K, INGGS M. Stepped OFDM radar technique to resolve range and Doppler simultaneously [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(2): 937-950.

作者简介



胡念平 男, 1985年生, 湖北孝感人。陆军特种作战学院讲师, 硕士, 主要研究方向为雷达协同侦察、低慢小目标检测等。

E-mail: 595579266@qq.com



田旋旋 女, 1987年生, 山东菏泽人。广州航海学院讲师, 博士, 主要研究方向为雷达通信一体化、无人机协同组网等。

E-mail: tianxuanxuan2023@163.com

(责任编辑: 刘建新)