

数字电视外辐射源雷达多旋翼无人机微多普勒效应实验研究

刘玉琪 易建新* 万显荣* 程丰 饶云华 龚子平

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘要: 该文论述了利用数字电视外辐射源雷达开展多旋翼无人机微多普勒效应实验的研究结果。首先建立了双基地外辐射源雷达无人机微动信号模型,接着简要阐述了微动信号提取的相关关键技术,最后重点介绍了实验开展情况,包括实验场景配置、无人机微多普勒效应实验典型结果与分析。实验结果与无人机运动参数的理论分析相符合,证实了利用数字电视外辐射源雷达实现多旋翼无人机微多普勒效应探测的技术可行性。

关键词: 外辐射源雷达; 数字电视信号; 无人机; 微多普勒效应

中图分类号: TN958.97

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)05-0585-08

DOI: 10.12000/JR18062

引用格式: 刘玉琪, 易建新, 万显荣, 等. 数字电视外辐射源雷达多旋翼无人机微多普勒效应实验研究[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 585–592. DOI: 10.12000/JR18062.

Reference format: Liu Yuqi, Yi Jianxin, Wan Xianrong, et al.. Experimental research on micro-Doppler effect of multi-rotor drone with digital television based passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 585–592. DOI: 10.12000/JR18062.

Experimental Research on Micro-Doppler Effect of Multi-rotor Drone with Digital Television Based Passive Radar

Liu Yuqi Yi Jianxin Wan Xianrong Cheng Feng Rao Yunhua Gong Ziping

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, experimental results of micro-Doppler effect on a multi-rotor drone with digital television based passive radar are discussed. First, the bistatic passive radar micro-motion model of the drone is established. Second, key techniques of micro-motion signal extraction are briefly described. Finally, the experimental process is introduced, including experimental scene configuration and analysis of typical experimental results of micro-Doppler effect. The experimental results agree with the theoretical analysis of the motion parameters of the drone, thereby confirming the technical feasibility of detecting the micro-Doppler effect of the multi-rotor drone using the digital television based passive radar.

Key words: Passive radar; Digital television signal; Drone; Micro-Doppler effect

1 引言

近年来, 无人机擅闯敏感区域的新闻频频见诸

报端, 美国白宫、日本首相官邸等安保要地都曾发生无人机入侵事件。2017年4月份, 成都双流机场多次受黑飞无人机干扰, 影响60余架航班的正常起降, 严重扰乱了机场飞行秩序^[1]。2018年8月4日, 委内瑞拉总统马杜罗在首都加拉加斯出席军队纪念演讲时, 遭遇无人机炸弹袭击, 爆炸引起现场极度混乱^[2]。事实上, 无人机正成为不法分子窃取秘密情报、危害国家安全和公共安全的新工具。需要指出的是, 侵入上述要地的大部分无人机均为消费级无人机(如: 大疆精灵, 3D Robotics等), 这些无人机成本较低、易于获取、改装容易、操控简单、用户数量多、监管难度大, 极易被不法分子利用, 给反恐、维稳、安保、警卫、禁毒、保密等领域工

收稿日期: 2018-08-28; 改回日期: 2018-10-04; 网络出版: 2018-10-22

*通信作者: 易建新 jxyi@whu.edu.cn; 万显荣 xrwan@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502403), 博士后创新人才支持计划(BX201600117), 国家自然科学基金(61701350, 61331012), 湖北省科技支撑项目(2015BCE075), 湖北省自然科学基金(2016CFA061)

Foundation Items: National Key Research and Development Program (2016YFB0502403), Postdoctoral Innovative Talent Support Program (BX201600117), The National Natural Science Foundation of China (61701350, 61331012), Science and Technology Support Project of Hubei Province (2015BCE075), The Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFA061)

作带来巨大压力。

由于相关法规不健全, 监管缺失, 在消费级无人机市场迎来井喷发展的今天, 解决无人机监控问题已成为维护国家安全、公众安全、社会安全的重要保障。消费级无人机飞行高度低、飞行速度慢、体积小, 是典型的“低慢小”目标。目前针对此类目标的监控手段主要包括光电红外、无线电侦测、声学探测和雷达探测^[3,4]。其中雷达探测距离远, 搜索能力强, 探测目标类型广泛, 与其他探测技术相比具有不可替代的优势。传统监测雷达均为主动雷达, 存在电磁辐射、频率拥挤、部署困难、成本较高等问题, 难以大规模推广应用。而外辐射源雷达作为一种绿色环保、经济安全的被动式探测手段近年来获得学术界的广泛关注^[5-8], 相关实验证实了该体制雷达对无人机探测的可行性^[9-11], 其中武汉大学电波传播实验室率先采用UHF波段数字电视外辐射源雷达实现了消费级无人机的连续跟踪, 并通过组网实验, 验证了该体制雷达的检测和定位跟踪性能^[12,13]。

然而, “低慢小”目标种类繁多(无人机、鸟类、气球、滑翔伞等), 其目标散射截面积(RCS)和运动状态接近, 很难从雷达回波谱中加以区分。因此, 上述目标的分类识别亦成为该领域研究的难点^[14,15]。相对于其他“低慢小”目标, 无人机叶片的转动对雷达回波产生调制, 目标具有微动特征。由于微动属于目标的精细结构, 通常被认为是目标独一无二的运动状态, 因此微多普勒效应提供了目标RCS之外的特征信息, 对雷达目标特征提取与分类识别具有重要价值^[16,17]。据调研所及, 有关利用外辐射源雷达进行无人机微多普勒效应的研究尚少见报道。

本文围绕数字电视外辐射源雷达多旋翼无人机微多普勒效应探测实验展开讨论, 主要包括多旋翼无人机目标微动信号模型、信号处理关键技术、实验场景以及典型实验结果分析。

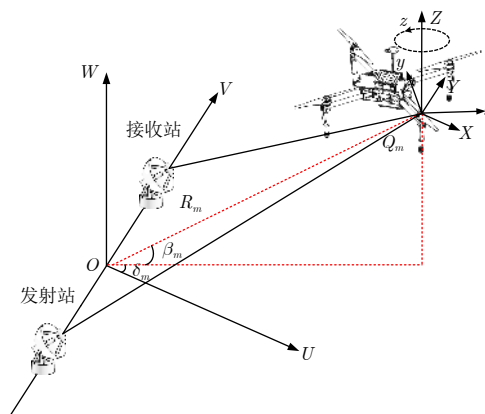
2 多旋翼无人机目标微动信号模型

外辐射源雷达是一种典型的双/多基地雷达系统, 图1(a)为多旋翼无人机旋转叶片与双基地外辐射源雷达位置关系示意图^[18,19]。其中无人机旋翼个数为 M , 每个旋翼包含 K 个旋转叶片。不失一般性, 此处选取第 m 个旋翼上的第 k 个旋转叶片分析。为便于描述旋转叶片相对于雷达的旋转运动, 需建立3个坐标系, 分别为空间固定坐标系、目标固定坐标系和参考坐标系, 如图1(a)所示, 坐标系 (U, V, W) 为空间固定坐标系, 原点 O 位于双基地雷

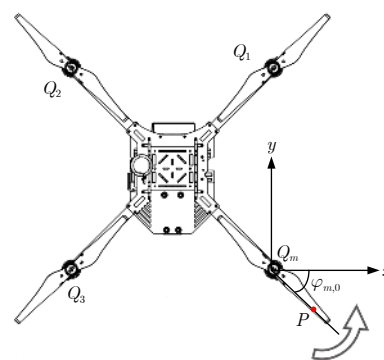
达基线中点。坐标系 (x, y, z) 为目标固定坐标系, 其原点 Q_m 取在第 m 个旋翼的中心点, 旋转叶片在 $(x, y, z = 0)$ 平面上以角速度 Ω_m 绕 z 轴旋转。坐标系 (X, Y, Z) 为参考坐标系, 平行于空间固定坐标系, 在无人机目标运动的起始时刻, 其坐标原点 Q_m 在空间固定坐标系中的方位角和仰角分别为 δ_m 和 β_m , Q_m 点到基线中点的距离矢量为 R_m 。

从电磁散射的观点, 旋转叶片由散射中心组成。假定旋翼无人机处于悬停状态, 目标固定坐标系与参考坐标系重合, 如图1(b)所示。叶片上某散射点 P 的初始旋转角为 $\varphi_{m,0}$, 在参考坐标系中的坐标为 $(x_p, y_p, 0)$, P 点到参考坐标系的原点距离为 $l_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$ 。散射点 P 以恒定角速度 Ω_m 绕目标固定坐标系中的 z 轴旋转, 则在时间 t , P 点旋转角变为 $\varphi_{m,t} = \varphi_{m,0} + \Omega_m t$, 在参考坐标系中的坐标变为 $(x_{pt}, y_{pt}, 0)$, 于是散射点 P 到空间固定坐标系原点的距离为:

$$R_{m,p}(t) = \sqrt{l_p^2 + R_m^2 + 2R_m \cos \beta_m (x_{pt} \cos \delta_m + y_{pt} \sin \delta_m)} \quad (1)$$



(a) 无人机空间位置
(a) The space position of drone



(b) 无人机旋翼旋转平面
(b) Rotating plane of drone rotors

图 1 外辐射源雷达无人机旋转叶片回波模型

Fig. 1 Model of drone rotating blades echo for passive radar

此处假定在远场条件, $(l_p/R_m)^2 \rightarrow 0$, 则式(1)可近似为:

$$R_{m,p}(t) \approx R_m + l_p \cos \beta_m \cos(\varphi_{m,t} - \delta_m) \quad (2)$$

那么从散射点 P 返回的基带信号为:

$$\begin{aligned} s_{m,p}(t) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_{m,p}(t) \right\} \\ &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_m + l_p \cos \beta_m \cos(\varphi_{m,t} - \delta_m) \right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

在叶片的整个长度 L 上对式(3)进行积分, 得到总的基带信号为:

$$\begin{aligned} s_{m,L}(t) &= \int_0^L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_m + l_p \cos \beta_m \cos(\varphi_{m,t} - \delta_m) \right] \right\} dl_p \\ &= L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_m + \frac{L}{2} \cos \beta_m \cos(\varphi_{m,t} - \delta_m) \right] \right\} \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos \beta_m \cos(\varphi_{m,t} - \delta_m) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\text{sinc}(\cdot)$ 是辛克函数: 当 $x = 0$ 时, $\text{sinc}(x) = 1$; 当 $x \neq 0$ 时, $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。

对于具有 M 个旋翼且每个旋翼有 K 个旋转叶片的多旋翼无人机目标, 第 m 个旋翼上的 K 个旋转叶片具有 K 个不同的初始旋转角:

$$\begin{aligned} \varphi_{m,k} &= \varphi_{m,0} + k2\pi/N, \quad k = 0, 1, \dots, K-1; \\ m &= 0, 1, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (5)$$

则第 m 个旋翼上旋转叶片反射的总的信号为:

$$\begin{aligned} s_{m,\Sigma}(t) &= L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_m \right\} \\ &\quad \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \text{sinc} \{ \Phi_{m,k}(t) \} \exp \{ -j \Phi_{m,k}(t) \} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 相位函数 $\Phi_{m,k}(t)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \Phi_{m,k}(t) &= \frac{4\pi}{\lambda} \frac{L}{2} \cos \beta_m \\ &\quad \cdot \cos \left(\Omega_m t + \varphi_{m,0} + \frac{2\pi k}{N} - \delta_m \right) \end{aligned} \quad (7)$$

则总的接收信号为:

$$\begin{aligned} s_{\Sigma}(t) &= \sum_{m=0}^{M-1} L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} R_m \right\} \\ &\quad \cdot \sum_{k=0}^{K-1} \text{sinc} \{ \Phi_{m,k}(t) \} \exp \{ -j \Phi_{m,k}(t) \} \end{aligned} \quad (8)$$

单一叶片回波的瞬时多普勒频率可由信号的相

位函数求时间导数得到, 则第 m 个旋翼的第 k 个旋转叶片的等效瞬时微多普勒频率为:

$$\begin{aligned} f_{m,k}(t) &= -\frac{2\pi\Omega_m L}{\lambda} \cos \beta_m \\ &\quad \cdot \sin \left(\Omega_m t + \varphi_{m,0} + \frac{2\pi k}{N} - \delta_m \right) \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知, 旋转叶片的最大瞬时微多普勒频率

$$f_{m,k}^{\max} = \frac{\Omega_m L}{\lambda} \cos \beta_m \quad (10)$$

即, 最大瞬时微多普勒频率与叶片角速度 Ω_m , 叶片长度 L , 波长 λ 以及仰角 β_m 有关。

3 信号处理关键技术

图2给出了外辐射源雷达信号处理的典型方案。与主动雷达不同, 外辐射源雷达中至少设置两个通道: 参考通道和监测通道, 分别接收来自发射站的参考信号和目标回波信号。纯净参考信号和杂波抑制后监测信号匹配滤波得到距离多普勒谱, 从谱上即可提取目标的微多普勒信息。不同于民航客机, 消费级无人机是典型的“低慢小”目标, 为检测微弱的无人机微多普勒信号, 在避免徙动前提下, 需尽可能增加相干积累时间以增大目标信噪比, 这为后续信号实时处理提出新的需求和挑战。

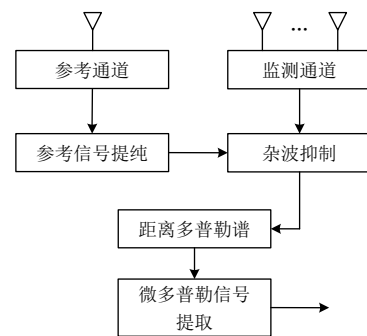


图2 外辐射源雷达信号处理典型方案

Fig. 2 Typical signal processing scheme of passive radar

(1) 参考信号获取

与主动雷达发射波形先验已知不同, 外辐射源雷达系统的参考信号是不可预知的, 单纯通过波束形成获取的参考信号不可避免地混入多径杂波和噪声, 而参考信号的纯净程度直接影响着外辐射源雷达杂波抑制效果和匹配滤波结果。在数字电视外辐射源雷达中, 基于重构的信号提纯方法可以获得更为干净的参考信号^[20,21]。该方法利用数字电视信号固有的帧结构, 本质是对发射端信号的解调与再调制过程, 其具体提纯流程如图3所示。

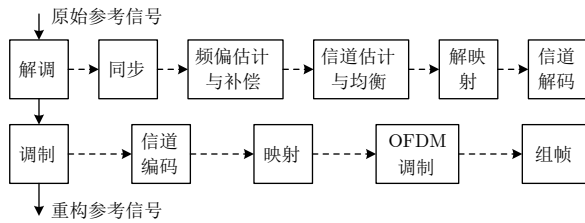


图 3 参考信号提纯流程图

Fig. 3 Flow chart of reference signal reconstruction

(2) 杂波抑制

直达波和多径杂波对目标的掩盖是外辐射源雷达所普遍面临的问题。在无人机微多普勒效应探测中,无人机旋转叶片散射截面积小,回波能量弱,需长时间相干积累以增大目标信噪比。常规时域杂波抑制方法计算复杂度高、收敛速度慢,算法实时性难以保证,而空域方法受限于阵列孔径,在复杂多径环境下杂波抑制性能有限。本文充分结合数字电视信号的OFDM调制特性,将OFDM符号有效数据部分变换到频域进行杂波抑制^[22,23],降低了杂波抑制的空域自由度要求。对比传统空、时域方法,该方法快速稳健,不受阵列孔径限制,杂波抑制能力强,满足算法实时性需求。其具体信号处理流程如图4所示。

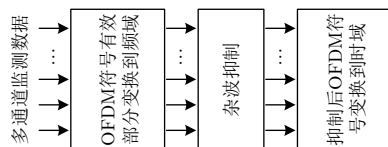


图 4 杂波抑制流程图

Fig. 4 Flow chart of clutter suppression

(3) 距离多普勒谱计算

距离多普勒谱是实现目标检测的关键,外辐射源雷达所利用第三方辐射源为连续波发射,常规互模糊函数法计算量大,内存需求高,实用困难。本文结合数字电视信号的帧结构及传统的线性调频连续波原理,将连续信号按OFDM符号划分为快时间维和慢时间维,利用“距离相关+多普勒变换”的方法快速实现距离多普勒谱的计算^[24]。

4 实验结果

4.1 实验方案与配置

武汉大学利用新一代UHF波段数字电视外辐射源雷达系统于2017年8月底开展了无人机微多普勒效应实验研究。实验场景配置如图5所示,接收站位于武汉大学电子信息学院楼顶,采用均匀线阵,发射站为武汉龟山电视塔(信号中心频率658 MHz,带宽8 MHz,功率300 W,垂直极化),位于接收

站北偏西75.6°,7.5 km处。图6展示了实验所用大疆M100无人机,该无人机旋翼数为4,每旋翼叶片数为2,叶片长度17.25 cm。旋翼采用E800动力系统,电机KV值为350 rpm/V,标配电池输出电压22.2 V^[25],则旋翼最大转速为129.5 rps。实际悬停或飞行状态下,无人机旋翼转速为最大值的25%~100%^[26]。实验中为充分考察旋转叶片的微多普勒效应,将该无人机分别悬停于监测阵列前方309 m和508 m,距阵列高度100 m处采集数据,此时悬停状态下的无人机主体多普勒频率可忽略不计。在这两种几何配置下,无人机主体相对于空间固定坐标系原点的仰角 β 均约为1.4°。为简化模型,在远场模式下,可将该仰角近似为各旋翼相对于空间固定坐标系原点的仰角。

4.2 实测结果分析

实验中为探测无人机旋转叶片微弱的微多普勒信号,每场数据积累时间为1 s。图7为无人机悬停于阵列前方309 m处采集的一组数据处理结果,此时目标位于距离多普勒谱的第20个距离元附近,有效数据持续时间为304 s。图7(a)为其中一场数据杂波抑制前的距离多普勒谱,可见强直达波和多径杂波的副瓣掩盖了无人机主体回波和旋转叶片的调制回波。经杂波抑制后的距离多普勒谱如图7(b)所示,此时直达波、多径杂波和无人机主体回波被抑制,各旋翼旋转叶片的调制回波凸显,表现在频谱上即为目标所在距离元处的回波峰值。为进一步分

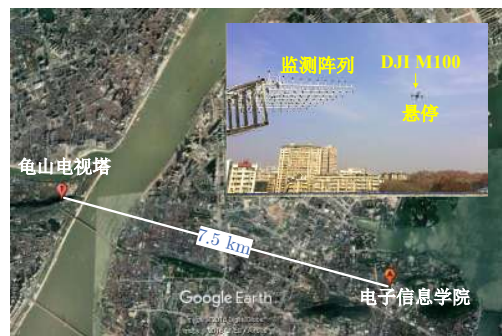


图 5 微多普勒效应探测实验场景

Fig. 5 Experimental scenario of micro-Doppler effect detection



图 6 大疆M100无人机

Fig. 6 The drone of DJI M100

析该峰值特性，图7(c)给出了峰值所在距离元截面，从图中可看出零多普勒轴对称两侧多条峰值，且各峰值多普勒频率存在微小差异。这是因为悬停状态无人机为保持主体平衡，会动态调整各旋翼转速，而各旋翼转速的不同导致旋转叶片调制回波的频率略有不同。由式(10)可知，该无人机最大瞬时多普勒频率理论上限约为308 Hz，大于图中所得的189 Hz，这是因为无人机悬停时，旋翼转速小于最大转速，此时实测最大瞬时多普勒频率为理论上限的61.4%，在25%~100%的合理区间内，表明该回波峰值即为无人机旋转叶片所产生的微多普勒调制信号。图7(d)为连续时间内目标所在距离元截面，可以看出在304场有效数据中均能观察到无人机的微多普勒效应，且无人机各旋翼转速的不同导致该微多普勒效应占据多个多普勒单元。

为进一步验证实验结果的可靠性，保持实验参数不变，仅将无人机悬停于监测阵列前方508 m处，此时目标位于距离多普勒谱的第31个距离元附近，有效数据持续时间为280 s。图8(a)、图8(b)为杂波抑制前后的距离多普勒谱，同样可见杂波抑制后的无人机微多普勒效应。图8(c)为目标所在距离

元截面，对比图7(c)可看出旋转叶片回波变弱，这是因为无人机远离监测阵列时，旋转叶片回波能量减弱。此时叶片最大瞬时多普勒频率约为194 Hz，为理论上限的63.0%，亦在25%~100%的合理区间内。图8(d)显示了连续280场杂波抑制后的目标距离元截面，同样可成功观察到无人机旋转叶片的微多普勒效应。

5 结束语

消费级无人机的快速发展为低空监控提出新的挑战，本文从无人机监管现状、外辐射源雷达无人机微动信号模型、信号处理关键技术、实验场景配置以及实验结果分析等几个方面介绍了利用数字电视外辐射源雷达开展多旋翼无人机微多普勒效应探测的实验研究。实验结果证实了该新体制雷达用于无人机微多普勒效应探测的可行性，为数字电视外辐射源雷达“低慢小”目标分类识别奠定了基础。后续工作将围绕不同“低慢小”目标的微多普勒效应探测开展实验，并研究基于微多普勒特征的“低慢小”目标分类与识别方法，相关工作将进一步拓展外辐射源雷达对“低慢小”目标的监控能力。

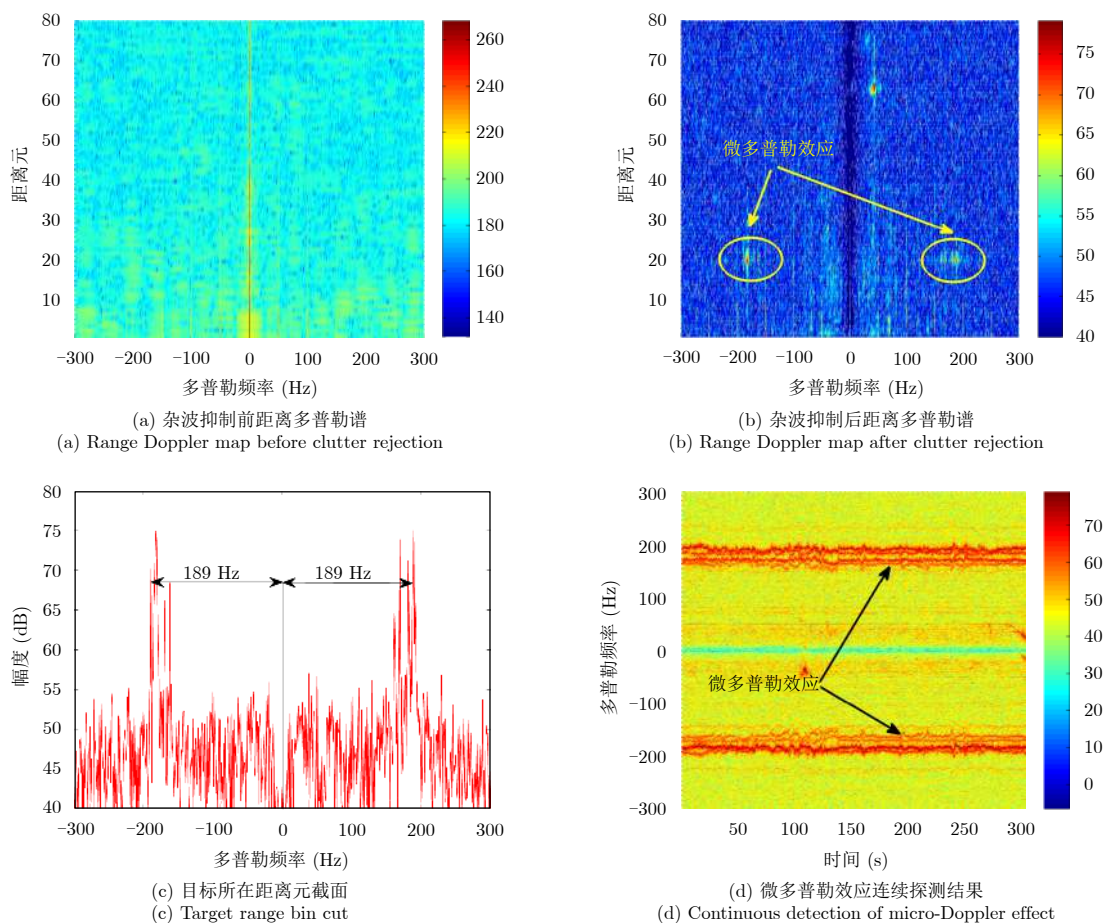


图7 无人机悬停于309 m处的处理结果

Fig. 7 Experimental results of drone hovering at 309 m

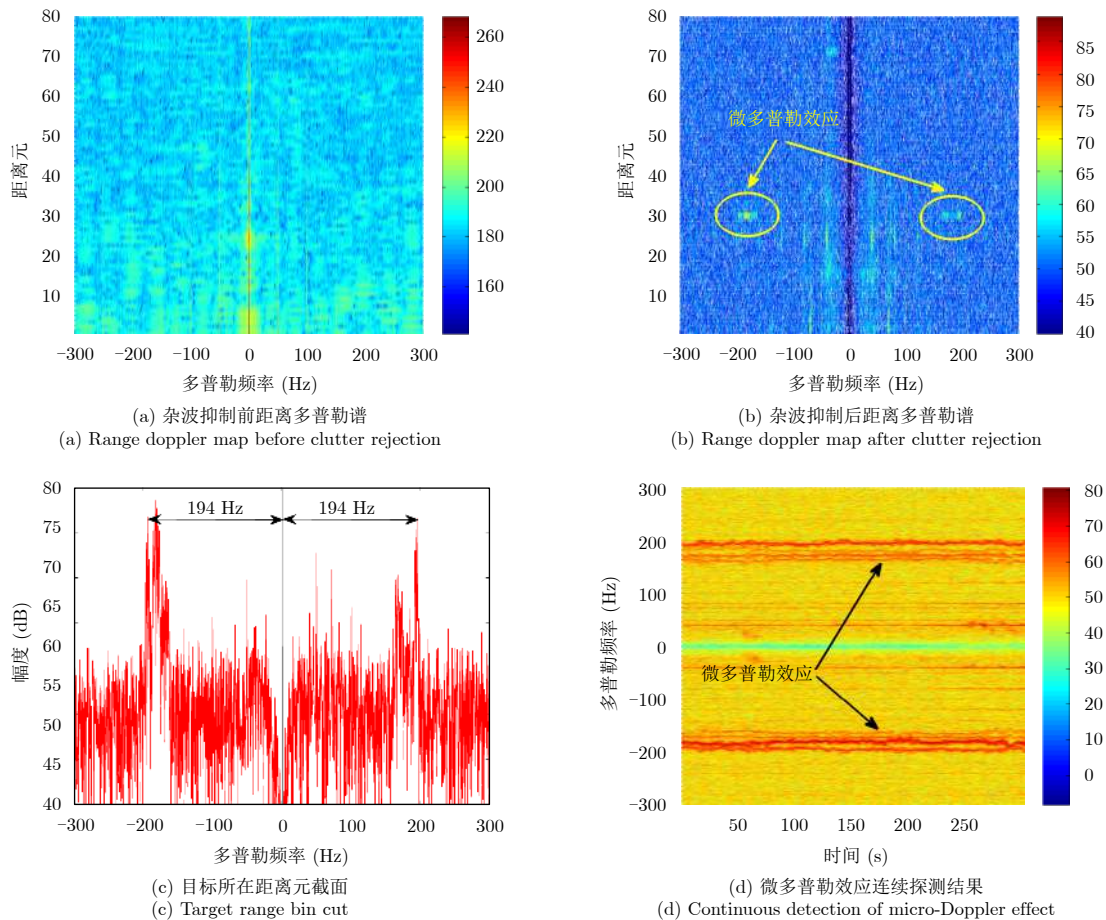


图8 无人机悬停于508 m处的处理结果

Fig. 8 Experimental results of drone hovering at 508 m

参考文献

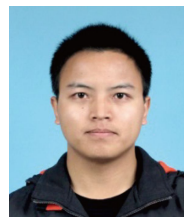
- [1] Yan L. Police seek pilots after over 60 flights disrupted at Chengdu airport[EB/OL]. <http://www.ecns.cn/2017/04-24/254565.shtml>. 2017.
- [2] Wikipedia. Caracas drone attack[EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Caracas_drone_attack. 2018.
- [3] 盛鹏峰. 机场净空区无人机入侵防范关键技术分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(6): 5-9. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4288.2017.06.001.
Sheng Peng-feng. Brief analysis of key techniques for UAV invasion defense in obstacle limitation space[J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2017, 28(6): 5-9. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4288.2017.06.001.
- [4] Sturdivant R L and Chong E K P. Systems engineering baseline concept of a multispectral drone detection solution for airports[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 7123-7138. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2697979.
- [5] 万显荣. 基于低频段数字广播电视信号的外辐射源雷达发展现状与趋势[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 109-123. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20027.
Wan Xian-rong. An overview on development of passive radar based on the low frequency band digital broadcasting and TV signals[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 109-123. DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20027.
- [6] Kuschel H. Approaching 80 years of passive radar[C]. Proceedings of 2013 International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2013: 213-217.
- [7] 张强, 万显荣, 傅奕, 等. 基于CDR数字音频广播的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理[J]. 雷达学报, 2014, 3(6): 702-710. DOI: 10.12000/JR14050.
Zhang Qiang, Wan Xian-rong, Fu Yan, et al. Ambiguity function analysis and processing for passive radar based on CDR digital audio broadcasting[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6): 702-710. DOI: 10.12000/JR14050.
- [8] 王本静, 易建新, 万显荣, 等. LTE外辐射源雷达帧间模糊带分析与抑制[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 514-522. DOI: 10.12000/JR18025.
Wang Ben-jing, Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, et al. Inter-frame ambiguity analysis and suppression of LTE signal for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 514-522. DOI: 10.12000/JR18025.
- [9] Knoedler B, Zemmari R, and Koch W. On the detection of small UAV using a GSM passive coherent location system[C]. Proceedings of the 2016 17th International Radar Symposium, Krakow, Poland, 2016: 1-4.

- [10] Chadwick A D. Micro-drone detection using software-defined 3G passive radar[C]. Proceeding of 2017 International Conference on Radar Systems, Belfast, UK, 2017: 1–6.
- [11] Rzewuski S, Kulpa K, Salski B, *et al.*. Drone RCS estimation using simple experimental measurement in the WIFI bands[C]. 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, Poland, 2018: 695–698.
- [12] Liu Y Q, Wan X R, Tang H, *et al.*. Digital television based passive bistatic radar system for drone detection[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA, USA, 2017: 1493–1497.
- [13] Fang G, Yi J X, Wan X R, *et al.*. Experimental research of multistatic passive radar with a single antenna for drone detection[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 33542–33551. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2844556](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2844556).
- [14] Zhang W Y and Li G. Detection of multiple micro-drones via cadence velocity diagram analysis[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(7): 441–443. DOI: [10.1049/el.2017.4317](https://doi.org/10.1049/el.2017.4317).
- [15] Oh B S, Guo X, Wan F Y, *et al.*. Micro-Doppler mini-UAV classification using empirical-mode decomposition features[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(2): 227–231. DOI: [10.1109/LGRS.2017.2781711](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2781711).
- [16] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 3–16.
Zhang Qun and Luo Ying. Micro-Doppler Effect of Radar Targets[M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2013: 3–16.
- [17] Li G, Zhang R, Ritchie M, *et al.*. Sparsity-driven Micro-Doppler feature extraction for dynamic hand gesture recognition[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(2): 655–665. DOI: [10.1109/TAES.2017.2761229](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2761229).
- [18] Xia P, Wan X R, Yi J X, *et al.*. Micro-Doppler imaging for fast rotating targets using illuminators of opportunity[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(6): 1024–1029. DOI: [10.1049/iet-rsn.2015.0206](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2015.0206).
- [19] 李宇倩, 易建新, 万显荣, 等. 外辐射源雷达直升机旋翼参数估计方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(3): 313–319. DOI: [10.12000/JR17125](https://doi.org/10.12000/JR17125).
Li Yu-qian, Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, *et al.*. Helicopter rotor parameter estimation method for passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(3): 313–319. DOI: [10.12000/JR17125](https://doi.org/10.12000/JR17125).
- [20] 万显荣, 岑博, 易建新, 等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达参考信号获取方法研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 338–343. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2011.00572](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00572).
Wan Xian-rong, Cen bo, Yi Jian-xin, *et al.*. Reference signal extraction methods for CMMB-based passive bistatic radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(2): 338–343. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2011.00572](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2011.00572).
- [21] Wan X R, Wang J F, Hong S, *et al.*. Reconstruction of reference signal for DTMB-based passive radar systems[C]. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, 2011: 165–168.
- [22] 赵志欣, 万显荣, 邵启红, 等. DRM无源雷达多径杂波的分载波空域抑制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 13–17.
Zhao Zhi-xin, Wan Xian-rong, Shao Qi-hong, *et al.*. Multipath clutter suppression by spatial filtering on each carrier in DRM-based passive radar[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(3): 13–17.
- [23] Yi J X, Wan X R, Zhao Z X, *et al.*. Subcarrier-based processing for clutter rejection in CP-OFDM signal-based passive radar using SFN configuration[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 1–13. DOI: [10.3724/SP.J.1300.2013.13030](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2013.13030).
- [24] 易建新, 万显荣, 方亮, 等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达相干积累的非均匀采样实现[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2648–2653. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2012.00540](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00540).
Yi Jian-xin, Wan Xian-rong, Fang Liang, *et al.*. Coherent integration implementation for China mobile multimedia broadcasting based passive radar with nonuniform sampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(11): 2648–2653. DOI: [10.3724/SP.J.1146.2012.00540](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.00540).
- [25] 大疆创新. DJI MATRICE 100 用户手册[EB/OL]. https://dl.djicdn.com/downloads/m100/M100_User_Manual_CN.pdf. 2016.
DJI Innovations. DJI MATRICE 100 User Manual[EB/OL]. https://dl.djicdn.com/downloads/m100/M100_User_Manual_CN.pdf. 2016.
- [26] Govoni M A. Micro-Doppler signal decomposition of small commercial drones[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, WA, USA, 2017: 425–429.

作者简介



刘玉琪(1990–), 男, 湖北随州人, 博士, 武汉大学, 研究方向为外辐射源雷达信号处理、实时信号GPU并行处理。
E-mail: yqlau@whu.edu.cn



易建新(1989–), 男, 湖南永州人, 博士, 武汉大学, 研究方向为外辐射源雷达信号处理、目标跟踪和信息融合。
E-mail: jxyi@whu.edu.cn



万显荣(1975-), 男, 湖北天门人, 博士, 武汉大学, 教授, 博士生导师, 研究方向为新体制雷达设计, 如外辐射源雷达、高频雷达系统及信号处理。

E-mail: xrwan@whu.edu.cn



程 丰(1975-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 武汉大学, 研究方向为雷达信号处理、目标检测与跟踪。

E-mail: cwing@whu.edu.cn



饶云华(1972-), 男, 重庆人, 博士, 武汉大学, 副教授, 研究生导师, 研究方向为新体制雷达、雷达系统设计、无线通信网等。

E-mail: ryh@whu.edu.cn

龚子平(1977-), 男, 讲师, 研究方向为电波传播与无线电海洋遥感等。

E-mail: osmar@163.com