

## 无人机电多普勒分集前视合成孔径雷达成像方法

孟智超<sup>①</sup> 卢景月<sup>①</sup> 谢朋飞<sup>①</sup> 张磊<sup>\*②</sup> 王虹现<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(中山大学电子与通信工程学院 广州 510275)

**摘要:** 前视合成孔径雷达(SAR)成像存在多普勒左右模糊的问题, 需要利用空域资源进行解模糊处理。限于无人机电(UAV)的载重与尺寸, 接收阵列通常较小, 解多普勒模糊的空域波束形成能力不足。此外, 前视SAR回波方位多普勒梯度小、带宽窄, 使得接收带宽未被充分利用。基于以上问题, 该文提出多普勒分集前视SAR成像方法。该算法在前视SAR成像技术的基础上, 利用多普勒分集MIMO技术, 将多普勒窄带前视回波调制于不同多普勒中心以达到充分利用多普勒接收带宽的目的。进而, 可获得一个数倍于真实接收阵列孔径的虚拟接收阵列, 极大地扩展了接收通道, 有效地改善了前视SAR成像解多普勒左右模糊的性能。

**关键词:** 前视SAR成像; 多输入多输出雷达; 多普勒分集; 自适应波束形成

中图分类号: TN975

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2852-07

DOI: 10.11999/JEIT190096

## Imaging Technology of Doppler Diversity Forward-looking SAR Imaging for Unmanned Aerial Vehicle

MENG Zhichao<sup>①</sup> LU Jinyue<sup>①</sup> XIE Pengfei<sup>①</sup> ZHANG Lei<sup>\*②</sup> WANG Hongxian<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(School of Electronic and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Forward-looking Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging has the problem of left-right Doppler ambiguity, so it is necessary to use spatial resources for ambiguity resolution. Due to the weight and size of Unmanned Aerial Vehicle (UAV), the receiving array is usually small, and the ability of spatial beam-forming for Doppler ambiguity resolution is insufficient. In addition, the small Doppler gradient and narrow bandwidth of forward-looking SAR echo make the receiving bandwidth underutilized. Based on the above problems, a Doppler diversity Multiple Input Multiple Output (MIMO) forward-looking SAR imaging method is proposed. Based on the forward-looking SAR imaging technology, the narrow-band forward-looking Doppler echo is modulated to different Doppler centers by using Doppler diversity MIMO technology to make full use of the Doppler receiving bandwidth. Furthermore, a virtual receiving array with several times the aperture of the real receiving array can be obtained, which expands greatly the receiving channel and improves effectively the performance of forward-looking SAR imaging in de-Doppler left-right ambiguity.

**Key words:** Forward-looking SAR imaging; Multiple Input Multiple Output (MIMO) radar; Doppler diversity; Adaptive beam forming

### 1 引言

无人机电(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在遥感、侦查、监视等对地观测中有着不可替代的优势, 尤其是在军事任务中, 无人机电以其价格低、安

全性高、航时长等特点已经在实战中占有了一席之地<sup>[1]</sup>。而合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)以其能够对地面进行高分辨成像的特点, 成为了侦查无人机电必备的传感器设备之一。近年来, 随着无人机电在实战中的大规模应用, 其任务更是由侦查拓展至即时打击领域, 诞生出一大批查打一体无人机电。该类无人机电自身可携带对地精确攻击武器, 以期在发现目标的同时便将其摧毁<sup>[2]</sup>。传统侧视SAR仅能对飞行航迹一侧成像, 限制了其在查打一体无人机电上的应用, 尤其是引导对地攻击、以及毁伤评估环节。

收稿日期: 2019-02-17; 改回日期: 2019-08-31; 网络出版: 2019-09-04

\*通信作者: 张磊 leizhang@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771372, 61771367), 上海市自然科学基金(16ZR1434900)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367), The Natural Science Foundation of Shanghai (16ZR1434900)

前视SAR能够对平台正前方、大范围、高分辨成像，成为了查打一体无人机载设备的首选。文献[3]最早提出前视合成孔径雷达的概念，文中采用垂直于航迹方向的实孔径阵列成像。由于载机平台尤其是中小型无人机平台的载重以及尺寸限制，阵列孔径一般较小，导致成像分辨率不高。为了提高前视SAR方位分辨率，文献[4,5]提出利用合成孔径结合曲线轨迹进行前视SAR成像。但是由于回波多普勒左右模糊的缘故，需要利用空域资源进行解模糊处理。文献[6]提出双天线解模糊方法，可以获得无模糊前视SAR图像。但是可以看到，解模糊性能与实孔径长度有关，阵列孔径越大波束形成器凹口越窄性能越好，反之则性能越差，使得左右图像出现重叠无法区分目标。因而接收阵列孔径大小对于前视SAR至关重要。在无人机较小的平台上，利用实孔径解模糊的性能将受到限制。另外，前视SAR回波多普勒带宽较小，但是由于成像分辨率、发射平均功率、场景大小等要求，前视SAR的方位向采样率将数倍于方位多普勒带宽[7]。回波仅占多普勒接收带宽的一小部分，接收带宽资源未被充分利用。

综上，前视SAR成像具有解模糊性能有限，多普勒接收带宽冗余的缺点。而MIMO雷达可以通过发射分集获得一个大于实孔径的虚拟接收孔径，一经提出便以其优异的探测性能[8]引起广大科研工作者的关注。MIMO雷达技术最早是应用于无线电通信领域中的一种技术[9-11]，Fishler等人[12]于2004年详细阐述了MIMO雷达的概念，Ender[13]在2007年又将MIMO技术拓展至SAR领域，提出MIMO-SAR (Multiple Input Multiple Output SAR, MIMO-SAR)的概念。通过同时发射多个正交波形信号，在接收端使用一组匹配滤波器实现多组信号的分离[14]，MIMO雷达可获得一个数倍于真实孔径的虚拟阵列孔径。通常情况下，最大可获得的虚拟通道数为发射通道数与接收通道数的乘积[15]。基于以上所述，本文提出多普勒分集MIMO前视SAR成像方法。本文方法以发射多普勒分集信号来获得一个数倍于实接收阵列孔径的虚拟接收阵列孔径，在不增加设备复杂度的情况下，使得接收阵列孔径变大。大的接收阵列孔径，提高了前视解模糊的性能。同时，本文方法充分利用多普勒接收带宽资源，将冗余频带资源转化为了有用的空域资源。其次，本文方法仅对发射信号进行多普勒调制，不需要重新设计正交信号，减少了系统设计及信号处理复杂度。

## 2 前视SAR成像几何模型及回波多普勒特性分析

前视SAR工作模式与传统SAR不同，平台运动

方向与距离向一致而与方位向垂直[16]，多通道阵列放置在垂直航迹方向。

图1所示为前视SAR成像几何模型，以雷达波束中心照射到目标的时刻为0时刻，平台飞行方向为X轴方向，阵列排布方向为Y轴方向，平台离地高度为Z轴方向。 $\alpha$ 为波束中心下视角， $\Delta\phi$ 为目标方位角。 $R_0$ 为波束中心斜距， $y$ 为目标Y轴坐标， $H$ 为平台飞行高度。平台以速度 $V$ 匀速直线飞行， $x$ 为 $t$ 时刻平台位置。非航迹线上目标 $P$ 到雷达的瞬时斜距为

$$R(t) = \sqrt{(Vt)^2 + R_0^2 - 2VtR_0 \cos(90^\circ - \alpha) + y^2} \quad (1)$$

令 $R_1 = \sqrt{y^2 + R_0^2}$ ，瞬时斜距可表示如式(2)

$$R(t) = \sqrt{R_1^2 + (Vt)^2 - 2VtR_0 \sin \alpha} \quad (2)$$

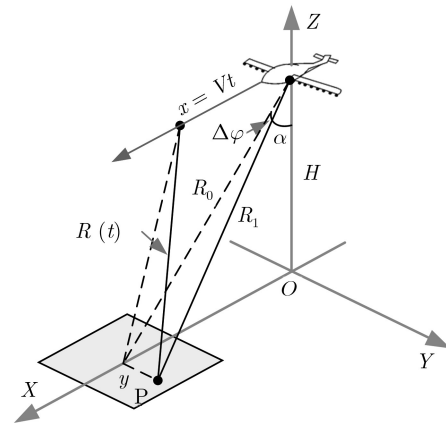


图1 前视SAR成像几何模型

由于合成孔径长度较短，合成孔径时间 $t$ 取值在0附近。将式(2)在 $t=0$ 处泰勒展开为

$$R(t) = R_1 - R_0 V \sin \alpha \frac{1}{R_1} t + \frac{1}{2} V^2 \left[ \frac{1}{R_1} - R_0^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{R_1^3} \right] t^2 + \dots \quad (3)$$

由式(3)得多普勒频率与多普勒调频斜率分别为

$$f_d = 2R_0 V \sin \alpha \frac{1}{\lambda R_1} \quad (4)$$

$$f_{dr} = -\frac{2V^2}{\lambda} \left[ \frac{1}{R_1} - R_0^2 \sin^2 \alpha \frac{1}{R_1^3} \right] \quad (5)$$

由式(4)可以看出多普勒频率与下视角 $\alpha$ 有关，不同的斜距对应不同的下视角 $\alpha$ 同时对应不同的 $f_d$ 。由于下视角 $\alpha$ 通常较大，从而 $f_d$ 的值亦较大。

因此，多普勒中心频率远大于多普勒带宽。多普勒带宽为

$$\begin{aligned} \Delta f_d &= f_{d_{\max}} - f_{d_{\min}} = \frac{2V R_0}{\lambda R_1} \left( \sin \left( \alpha + \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - \sin \left( \alpha - \frac{\Delta\alpha}{2} \right) \right) \\ &= \frac{2V R_0}{\lambda R_1} \cdot 2 \cos \alpha \sin \frac{\Delta\alpha}{2} \\ &\approx \frac{2V R_0}{\lambda R_1} \Delta\alpha \cos \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $\frac{R_0}{R_1} = \cos(\Delta\phi)$ , 为目标方位余弦,  $\Delta\alpha$  为俯仰向波束宽度。式(6)表明, 目标多普勒带宽既与波束下视角有关还与目标方位角有关。

由式(4)和式(6)可知, 对点目标来说, 方位回波信号是以式(4)为载频以式(6)为带宽的窄带信号。因此, 实际工作中方位信号向的采样率往往很大, 导致多普勒接收带宽冗余, 如图2所示。

可以看到, 当采样频率为9 kHz时, 回波信号的多普勒带宽仅占了多普勒接收带宽的一小部分, 其余带宽没有被充分利用。基于这一原因, 本文提出多普勒分集MIMO前视SAR工作模式, 通过引入多普勒分集技术充分利用多普勒接收带宽, 引入MIMO工作模式扩展接收阵列孔径。

### 3 多普勒分集MIMO前视SAR模型分析

相干MIMO雷达配置模式中, 发射天线阵列与接收天线阵列位于同一平台上, 可以等效为一个线性阵列。发射阵列与接收阵列其中之一为稀疏阵, 另一为密集阵。雷达同时向目标发射正交脉冲信

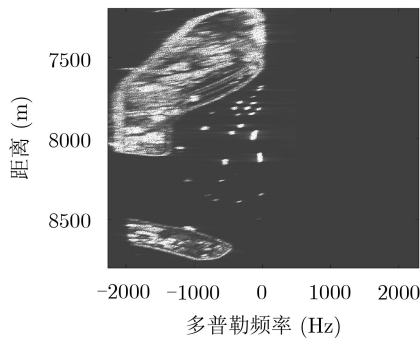
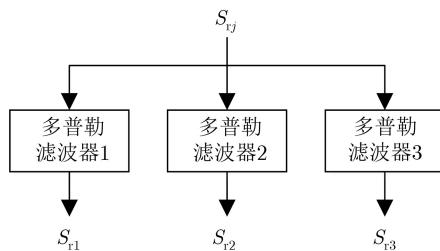


图2 前视SAR回波多普勒谱



(a) 数据接受示意图

号, 并同时接收所有回波信号。每个接收通道后接一组匹配滤波器, 便可得到来自不同发射通道的回波信号。因此, 对于拥有 $N$ 个发射通道 $M$ 个接收通道的MIMO雷达来说, 经过匹配滤波后可以得到 $MN$ 个通道的回波<sup>[15]</sup>。

本文利用5个通道, 配置3发3收线性阵列相干MIMO前视SAR, 可得到9通道的虚拟接收阵列。各个接收通道的回波数据经分离后可表示为式(7)

$$\mathbf{X} = [X_{t_1 r_1} \ X_{t_2 r_1} \ X_{t_3 r_1} \ \cdots \ X_{t_3 r_3}] \quad (7)$$

其中,  $X_{t_i r_j}$  表示由第 $j$ 个接收通道接收到的第 $i$ 个发射通道发射的信号, 下标 $t_i$ 表示第 $i$ 个发射通道,  $r_j$ 表示第 $j$ 个接收通道。

如图3所示, 图3(a)表示某一接收通道在接收到回波后利用一组多普勒滤波器将来自不同发射阵元的回波分离出来, 得到3个不同的回波信号。这3个信号的相位中心均不相同, 即相当于虚拟接收阵列上3个不同的阵元接收到的回波信号。图3(b)展示出本文3发3收模式下的实阵元排布与等效虚拟阵列。在实阵列中, 接收阵元间隔 $d_r = 0.5\lambda$ , 发射阵元间隔 $d_t = 1.5\lambda$ , 等效虚拟接收阵列中阵元间隔为 $d = 0.25\lambda$ , 避免了栅瓣的出现。

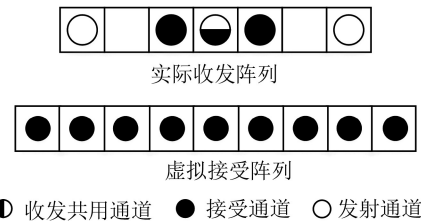
### 4 多普勒分集MIMO前视SAR回波信号分析

对于前述密集接收稀疏发射的相干MIMO前视SAR而言, 当发射阵列为 $N$ 通道接收阵列为 $M$ 通道时, 其发射流型为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_t(\theta) &= \left[ \exp \left( j2\pi \frac{Y_{t0} \sin \theta}{\lambda} \right), \exp \left( j2\pi \frac{Y_{t1} \sin \theta}{\lambda} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdots \exp \left( j2\pi \frac{Y_{tN-1} \sin \theta}{\lambda} \right) \right]^T \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $Y_{t_i}$  ( $i = 0, 1, \dots, N - 1$ ) 为 $N$ 个发射通道的通道 $Y$ 轴位置坐标。接收阵列流型为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_r(\theta) &= \left[ \exp \left( j2\pi \frac{Y_{r0} \sin \theta}{\lambda} \right), \exp \left( j2\pi \frac{Y_{r1} \sin \theta}{\lambda} \right) \right. \\ &\quad \left. \cdots \exp \left( j2\pi \frac{Y_{rM-1} \sin \theta}{\lambda} \right) \right]^T \end{aligned} \quad (9)$$



(b) 等效虚拟通道示意图

图3 3发3收数据接收与等效虚拟通道示意图

其中， $Y_{ri} (i = 0, 1, \dots, M - 1)$ 为 $M$ 个接收通道的通道 $Y$ 轴位置坐标。则虚拟接收阵列流型为

$$\begin{aligned}
 a(\theta) &= \text{kron}(\mathbf{a}_t, \mathbf{a}_r) \\
 &= \left\{ \exp \left[ j2\pi \sin(\theta) \frac{(Y_{t1} + Y_{r1})}{\lambda} \right] \right. \\
 &\quad \cdot \exp \left[ j2\pi \sin(\theta) \frac{(Y_{t1} + Y_{r2})}{\lambda} \right] \dots \\
 &\quad \left. \cdot \exp \left[ j2\pi \sin(\theta) \frac{(Y_{tN} + Y_{rM})}{\lambda} \right] \right\} \quad (10)
 \end{aligned}$$

若前视SAR发射信号为多普勒频率调制的线性调频信号

$$\begin{aligned}
 S_{tj}(t, t_m) &= \text{rect} \left( \frac{t}{T} \right) \exp(j\pi\gamma t^2) \exp(j2\pi f_c t) \\
 &\quad \cdot \exp(j2\pi f_{dj} t_m) \quad (11)
 \end{aligned}$$

其中，下标 $j$ 表示第 $j$ 个发射通道， $f_{dj}$ 为对信号的多普勒调制频率。 $t$ 为快时间变量， $t_m$ 为慢时间变量。这里不考虑天线方向图调制，则对于点目标，第 $i$ 个接收通道的回波为

$$\begin{aligned}
 S_{ri}(t, t_m) &= \sum_{j=1}^M A(\theta_0) S_{tj} \left( t - \frac{2R(t_m)}{C}, t_m - \frac{2R(t_m)}{C} \right) \\
 &\quad \cdot \exp \left[ j2\pi \sin(\theta_0) \frac{(Y_{ri} + Y_{tj})}{\lambda} \right] \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中， $\theta_0$ 为目标方位角度， $R(t_m)$ 为随慢时间变化的目标斜距。可以看到，每个接收通道都可以接收到所有的发射信号。每一个信号被预先调制上了不同的多普勒频率，在接收端，只需对每个接收通道的回波进行多普勒滤波，便能分离出来自于不同发射通道的回波信号如图4所示。由此，本文所用3发3收的相干MIMO前视SAR，可以获得9个接收通道的虚拟接收阵列与9组不同的回波信号。

在分离出各虚拟通道回波后，对各通道进行后向投影(Back Projection, BP)成像，得到多幅左右模糊的前视SAR图像。然后，利用波束形成技术解多普勒左右模糊即可得到无模糊的前视SAR图像。多普勒分集MIMO前视SAR成像流程如图5所示。

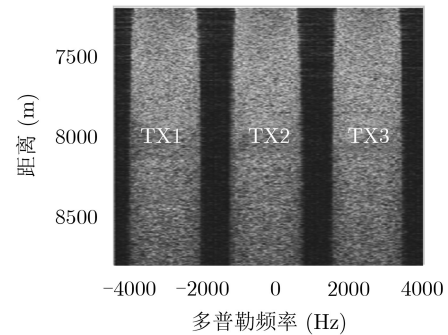


图4 某一接收通道回波多普勒域数据分布

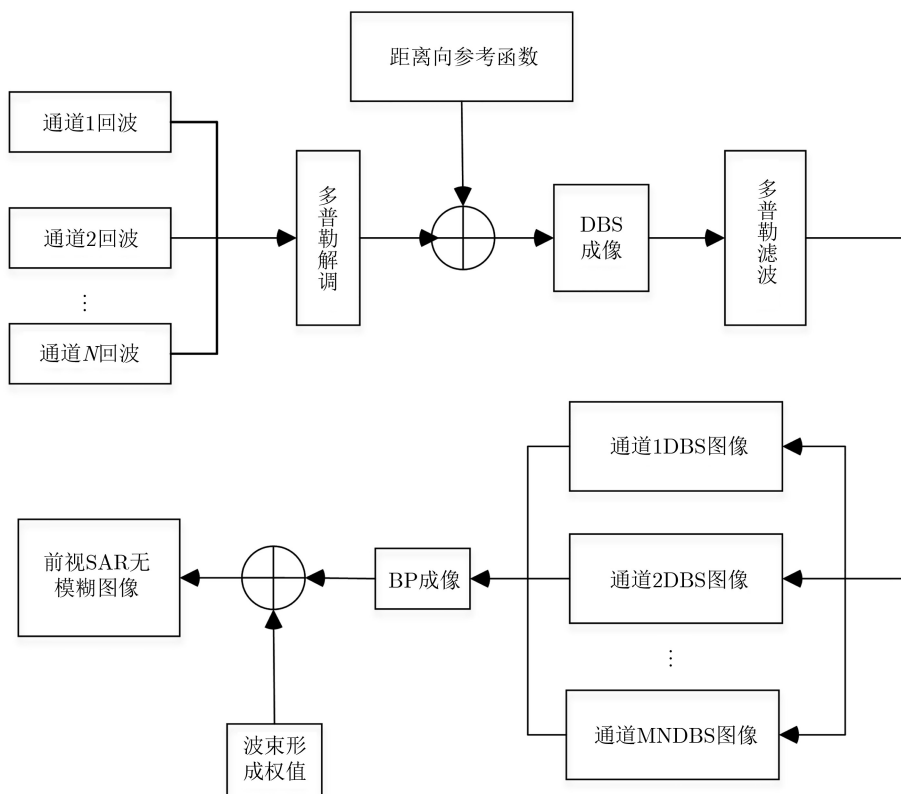


图5 MIMO前视SAR信号处理流程

图5中为了成像效果,选择对多普勒锐化(Doppler Beam Sharpening, DBS)后的图像进行BP成像再解模糊,此外也可以直接选择对DBS后的SAR图像进行解模糊成像,其结果是等价的。

### 5 仿真分析

仿真实验验证3发3收多普勒分集MIMO前视SAR系统并测试其波束形成解模糊性能。实验采用逆向仿回波,利用真实SAR图像作为基准图像。以此得到模拟目标场景的后向散射系数,进行回波仿真。仿真参数如表1。

3个发射通道的多普勒调制频率分别为 $f_{a1} = -1752$  Hz,  $f_{a2} = 1252$  Hz,  $f_{a3} = 4252$  Hz。首先对回波进行距离脉冲压缩,并做距离徙动矫正后将方位向信号变换至多普勒频率域如图6。

由图6可以看出,在对回波数据进行多普勒解

调前,回波在多普勒域是单一频谱的数次重复。每一个频谱所对应的数据均来自不同的发射通道,他们具有不同的相位中心。其次,对每一接收通道均进行多普勒解调并在原始多普勒谱所在频率范围内进行多普勒滤波,可依次获得每个虚拟接收通道的回波距离多普勒域数据。

如图7所示,在经过多普勒解调以后,每一个发射通道的回波均处于原始无多普勒调制状态下回波所在的多普勒频带内。这时,利用覆盖这一频带的带通滤波器可以将每个回波分离。分离后的结果为图7(c),其结果与原始无调制回波相同,但等效相位中心各不相同。最后,对上述分离出的回波进行BP成像并解左右模糊,结果如图8。

表 1 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
载频	35 GHz	脉冲重复频率	9 kHz
信号带宽	50 MHz	波束方位宽度	20°
脉冲宽度	0.5 μs	波束俯仰宽度	22°
采样带宽	60 MHz	场景中心斜距 $R_s$	8 km
平台高度	4000 m	阵列实孔径长度	0.0642 m

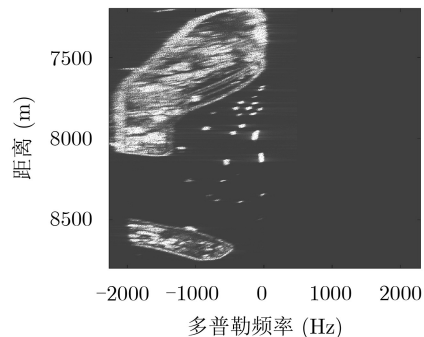


图 6 回波距离多普勒域

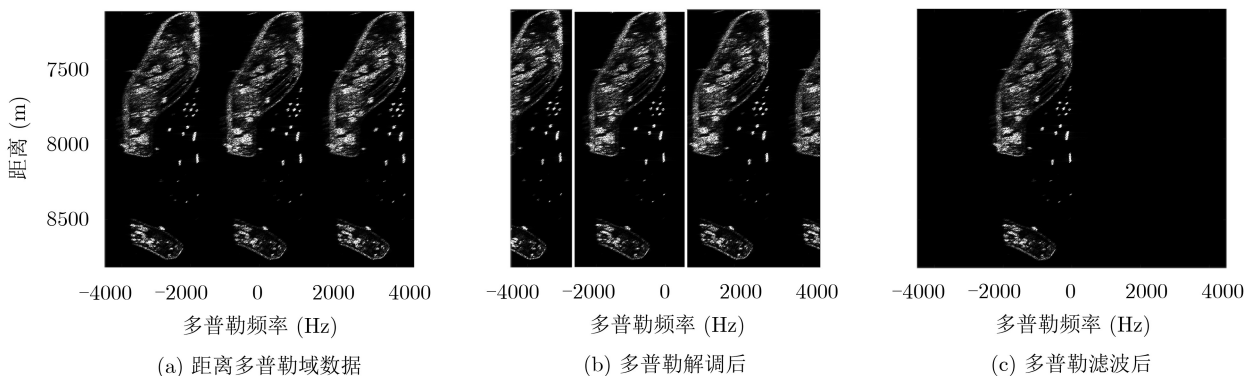


图 7 多普勒解调与多普勒滤波

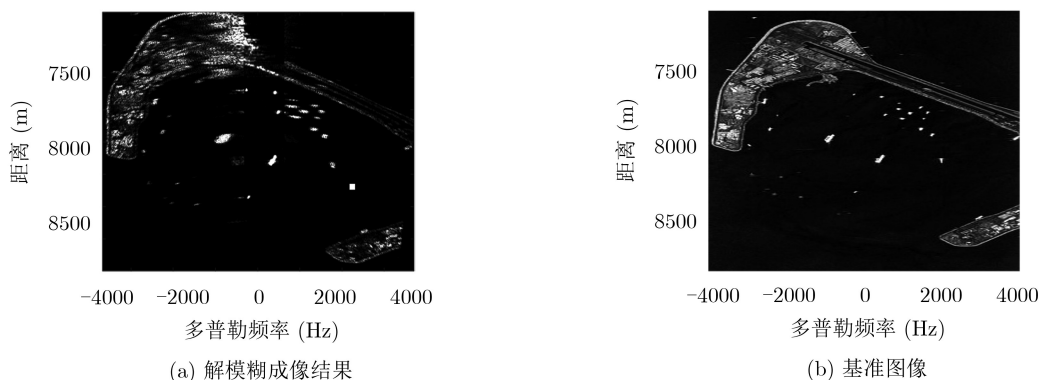


图 8 成像结果

图8所示即为解模糊成像结果, 经过9个虚拟通道的波束形成可以解开前视SAR的左右模糊, 得到不模糊前视SAR图像。对比成像结果与基准图像, 左边小岛上的建筑轮廓清晰可见, 整个岛屿边缘轮廓也被完整地呈现出来, 可见成像质量是比较高的。

图9为MIMO 3接收通道、SIMO 3接收通道和SIMO 9接收通道对点目标解模糊后的结果对比,

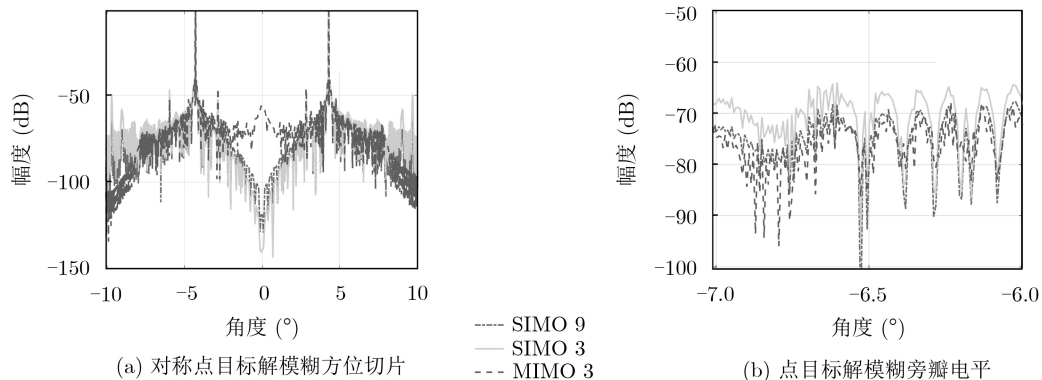


图9 点目标解模糊结果对比

## 6 结论

随着查打一体无人机在实战中的应用, 前视SAR成为无人机载对地观测设备的首选。但是限于无人机的载重以及尺寸, 实阵列孔径一般较小。较小的阵列孔径使得前视SAR成像解模糊能力不足, 前视SAR图像容易出现对称的虚假目标。为了改善解模糊性能, 前视SAR必须具有较大的接收阵列孔径。另外, 前视SAR回波多普勒带宽小, 导致接收带宽未被充分利用。针对以上问题, 本文提出多普勒分集MIMO前视SAR成像方法。所提方法结合多普勒分集MIMO技术, 充分利用冗余的多普勒接收带宽。在不增加设备复度的情况下, 获得一个大于实孔径的接收阵列孔径, 提高了解模糊的性能。另外, 该方法仅对发射信号进行多普勒调制, 减少了信号设计及信号处理复杂度。

## 参考文献

- [1] 高许岗, 雍延梅. 无人机载微型SAR系统设计与实现[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 35-38. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2014.01.006.
- [2] 赵博, 钱正祥, 黄晓雷. 无人机载SAR技术应用研究综述[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2009, 8(1): 24-25. doi: 10.3969/j.issn.1671-802X.2009.01.011.
- [3] ZHAO Bo, QIAN Zhengxiang, and HUANG Xiaolei. Survey on UAV-borne SAR techniques' application[J]. *Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology*, 2009, 8(1): 24-25. doi: 10.3969/j.issn.1671-802X.2009.01.011.
- [4] SUTOR T, BUCKREUSS S, KRIEGER G, et al. Sector imaging radar for enhanced vision (SIREV): Theory and applications[C]. The 2000 European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, Germany, 2000: 357-359.
- [5] 卢景月, 张磊, 王冠勇. 前视多通道合成孔径雷达解模糊成像方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(11): 2820-2825. doi: 10.11999/JEIT180177.
- [6] LU Jingyue, ZHANG Lei, and WANG Guanyong. Ambiguity resolving and imaging algorithm for multi-channel forward-looking synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2820-2825. doi: 10.11999/JEIT180177.
- [7] 卢景月, 张磊, 孟智超, 等. 曲线轨迹下前视多通道SAR解模糊成像算法[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 322745. doi: 10.7572/S1000-6893.2019.22745.
- [8] LU Jingyue, ZHANG Lei, MENG Zhichao, et al. Unambiguous imaging for forward-looking synthetic aperture radar on curve trajectory[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(6): 322745. doi: 10.7572/S1000-6893.2019.22745.
- [9] 包敏, 周鹏, 史林. 双天线前视弹载SAR解模糊算法研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(12): 2857-2862. doi: 10.3724/SP.J.

- 1146.2013.00083.  
BAO Min, ZHOU Peng, and SHI Lin. Study on deambiguity algorithm for double antenna forward looking missile borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2857–2862. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00083](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00083).
- [7] 武其松, 井伟, 邢孟道, 等. MIMO-SAR大测绘带成像[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(4): 772–775. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.01959](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.01959).
- WU Qisong, JING Wei, XING Mengdao, *et al.* Wide swath imaging with MIMO-SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 772–775. doi: [10.3724/SP.J.1146.2007.01959](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2007.01959).
- [8] GONG Min, WANG Xiaoming, and HUANG Shunji. Performance improvements in MIMO SAR[C]. 2008 IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1–3. doi: [10.1109/RADAR.2008.4720969](https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720969).
- [9] CHIZHIK D, FOSCHINI G J, GANS M J, *et al.* Keyholes, correlations, and capacities of multielement transmit and receive antennas[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2002, 1(2): 361–368. doi: [10.1049/el:20000828](https://doi.org/10.1049/el:20000828).
- [10] FOSCHINI G J and GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311–335. doi: [10.1023/A:1008889222784](https://doi.org/10.1023/A:1008889222784).
- [11] GESBERT D, BOLCSKEI H, GORE D A, *et al.* Outdoor MIMO wireless channels: Models and performance prediction[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2002, 50(12): 1926–1934. doi: [10.1109/TCOMM.2002.806555](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2002.806555).
- [12] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, *et al.* MIMO radar: An idea whose time has come[C]. 2004 IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2004: 71–78.
- [13] ENDER J H G. MIMO-SAR[C]. The International Radar Symposium, Cologne, Germany, 2007: 580–588.
- [14] 禹卫东, 李红霞. MIMO-SAR回波分离方法分析[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(4): 533–541. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.007).  
YU Weidong and LI Hongxia. Analysis of echo separation in MIMO-SAR[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(4): 533–541. doi: [10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9037.2014.04.007).
- [15] BLISS D W, FORSYTHE K W, DAVIS S K, *et al.* GMTI MIMO radar[C]. 2009 International Waveform Diversity and Design Conference, Kissimmee, 2009: 118–122.
- [16] 任笑真, 杨汝良. 机载前视SAR三维成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(6): 1361–1365. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00734](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00734).  
REN Xiaozhen and YANG Ruliang. Study on three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(6): 1361–1365. doi: [10.3724/SP.J.1146.2009.00734](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2009.00734).
- 孟智超: 男, 1997年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像与抗干扰.
- 卢景月: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 谢朋飞: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为合成孔径雷达成像.
- 张磊: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为合成孔径雷达成像, 目标识别.
- 王虹现: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理.