

一种基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法

李学仕* 孙光才 邵鹏 吴玉峰 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 在多通道合成孔径雷达动目标检测(SAR-GMTI)系统中, 直接利用传统的后多普勒空时自适应处理(PD-STAP)技术进行杂波抑制会导致 3 个问题。第一, 由于动目标径向速度引起的多普勒偏移会导致动目标出现谱卷绕, 直接利用匹配滤波的方法对动目标聚焦会出现虚假目标。第二, 在信号下采样的情况下, 动目标聚焦位置会出现脉冲重复频率(PRF)的偏差, 从而导致一个动目标可能出现在多个位置, 使得动目标检测变得复杂。第三, 利用传统的 PD-STAP 技术进行杂波抑制会导致很大的计算复杂性。基于此, 该文提出一种基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法进行杂波抑制处理, 可以有效解决上述问题。该文最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; Deramp 处理; 后多普勒空时自适应处理(PD-STAP); 动目标检测; 动目标成像

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)11-2659-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01803

A Space-time Adaptive Processing Method Based on Deramp Processing

Li Xue-shi Sun Guang-cai Shao Peng Wu Yu-feng Xing Meng-dao

(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In multichannel Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Targets Indication (SAR-GMTI) systems, three problems are led by utilizing the conventional Post Doppler-Space-Time Adaptive Processing (PD-STAP) technique. Firstly, the target Doppler spectrum is wrapped because of the Doppler shift caused by the cross-track velocity of the moving target. The ambiguities are appeared if directly using the matched filtering. Secondly, in the case of the signal undersampling, a Pulse Repeating Frequency (PRF) shifting is caused in the azimuth direction for a moving target in the focused image. This makes the moving target detection much more complicated and challenging. Thirdly, the traditional PD-STAP technique also has a high computational complexity. To overcome these problems, a novel space-time adaptive processing method based on Deramp processing is proposed. Simulation results validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: SAR; Deramp processing; Post Doppler-Space-Time Adaptive Processing (PD-STAP); Moving targets detection; Moving targets imaging

1 引言

地面运动目标检测与成像是现代雷达要完成的基本功能之一, 随着合成孔径雷达(SAR)的广泛应用, 基于 SAR 平台的运动目标检测与成像无论在军事上还是在民用上都有广泛的应用前景^[1-5]。在 SAR 中, 对运动目标的检测与成像而言, 静止背景的回波是干扰杂波, 要尽量地加以抑制。对干扰杂波的抑制有很多方法, 在传统的 SAR-GMTI 处理技术中, 主要有相位中心偏置天线技术^[6]、沿迹干涉技术^[7], 这些技术适用于通道数比较少的情况, 例如双

通道系统。然而, 在通道数较多的情况下, 空时自适应处理(Space-Time Adaptive Processing, STAP)技术可以提供更加优越的性能^[8-15]。文献[8]首先将 STAP 技术引入到多通道 SAR 中, 在 STAP 滤波之前对每个通道的数据先进行方位傅里叶变换, 即 PD-STAP 技术。文献[9]中证明了在 SAR 的条件下, 不同多普勒单元之间是解耦的, 从而保证了 PD-STAP 技术在多通道条带 SAR 中应用的可行性。文献[10]首先将动目标成像与 STAP 技术相结合, 并在文献[11]中进行了理论推导, 在文献[12]中利用 Radarsat-2 数据进行了实验验证。当地面运动目标速度和分辨率都较低时, 一般不需要考虑越距离单元走动。但运动目标速度较大或者 SAR 分辨率较高时, 会产生越距离单元走动, 动目标能量会分散到多个距离单元, 同时转换到图像域时动目标在方位向上严重散焦, 会导致信杂噪比降低, 因此不

2013-11-14 收到, 2014-05-06 改回

国家自然科学基金优秀青年基金(61222108), 国家自然科学基金青年基金(61301292, 61101245)和中央高校基本科研业务费专项(K5051302058, K5051302046)资助课题

*通信作者: 李学仕 lixueshi@stu.xidian.edu.cn

利于快速动目标检测。而本文采用基于数据域进行杂波抑制的方法,可以避免这种问题。

动目标的模糊来自于两个方面:一是由于动目标径向速度导致的频谱偏移,从而造成谱卷绕,二是由于方位欠采样造成的多普勒谱模糊。上面提到的传统 STAP 处理方法可以解决由于方位欠采样造成的多普勒谱模糊问题。但是它对于由于径向速度导致的谱卷绕是无能为力的。如果动目标本身的多普勒谱是卷绕的,得到的动目标的频谱依然是谱卷绕的。当动目标的多普勒谱发生卷绕的情况时,采用传统匹配滤波的方法直接对动目标进行成像时,会造成虚假目标的产生^[6]。在方位信号下采样的情况下,动目标在空时平面中存在模糊分量,采用传统的 STAP 方法进行杂波抑制时,当利用的动目标径向速度与其真实值不匹配时,会导致动目标的聚焦位置出现错误。此外,传统的 STAP 方法为保证不损失动目标的信杂噪比(Signal-to-Clutter-plus-Noise Ratio, SCNR),需要对动目标可能的径向速度范围内进行径向速度搜索,这会导致比较大的计算复杂性。为解决上述这些问题,本文提出了一种基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法。利用本文方法,杂波抑制后动目标的多普勒谱是压缩的,可以避免由于其径向速度造成谱卷绕的情况发生,因而可避免虚假目标的产生。同时由于动目标的多普勒谱得到了压缩,其在空时平面中不存在模糊分量,因而可以成功解决动目标聚焦位置出错的情况。而且,利用本文提出的杂波抑制方法,只需对基带范围内的速度进行搜索即可完成场景中所有动目标的处理,同时不会造成动目标 SCNR 的损失,可以大大降低计算复杂性。

本文内容安排如下:第2节对多通道动目标回波模型进行了建立;第3节对 Deramp 处理后的空时2维平面的特性进行了描述,并推导了基于 Deramp 处理的空时自适应方法;第4节对本文所提方法进行了仿真验证;第5节给出了全文总结。

2 多通道条带 SAR 动目标回波模型

多通道条带 SAR 动目标几何模型如图1所示, SAR 平台以速度 v 沿 X 方向运动,参考通道发射信号,全部通道接收回波信号。这里假设这 M 个通道已经经过双通道等效单通道处理,这个处理过程需补偿一个相位项,具体操作可见文献[16]。经过上述处理后,目标 B 距离第 m 个通道的瞬时斜距可以表示为

$$R_m(t_a) = \sqrt{(R_b + v_r t_a)^2 + (v t_a + d_m - v_a t_a)^2} \approx R_b + v_r t_a + \frac{((v - v_a)t_a + d_m)^2}{2R_b} \quad (1)$$

其中 t_a 为方位慢时间, v_r 为目标径向速度, v_a 为目标横向速度, d_m 为第 m 个通道距参考通道(Ref)距

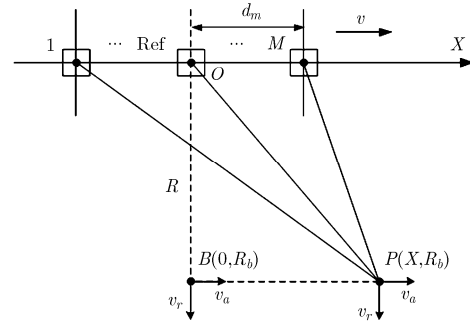


图1 多通道条带 SAR 动目标几何模型

离, $m = 1, 2, \dots, M$, M 为通道数。方位位置为 X 处的动目标 P 斜距历程可以表示为 $R_m(t_a - t_{cc})$ ^[6], 其中 $t_{cc} = X/(v - v_a)$ 。

则第 m 个接收通道接收的动目标回波信号可以表示为

$$s(\hat{t}, t_a; d_m) = w_r(\hat{t}) w_{az}(t_a - t_{cc}) w_{an}(d_m) \cdot \exp\left(j\pi\gamma\left[\hat{t} - \frac{2R_m(t_a - t_{cc})}{c}\right]^2\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_m(t_a - t_{cc})\right] \quad (2)$$

其中 \hat{t} 为距离快时间, $w_r(\cdot)$, $w_{az}(\cdot)$, $w_{an}(\cdot)$ 分别为距离窗函数, 方位窗函数以及通道加权, γ 为距离调频率, c 为电磁波在真空中传播速度。将式(2)的回波信号变到距离频域并消去距离二次项后得

$$s(f_r, t_a; d_m) = W_r(f_r) w_{az}(t_a - t_{cc}) w_{an}(d_m) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c}(f_c + f_r)\left[R_b + v_r(t_a - t_{cc}) + \frac{((v - v_a)(t_a - t_{cc}) + d_m)^2}{2R_b}\right]\right] \quad (3)$$

其中 f_r 为距离频率, f_c 为中心频率, $W_r(\cdot)$ 为距离频域窗函数。由于背景杂波对动目标信号的掩盖,本文需要对背景杂波进行抑制。下面将展开对背景杂波抑制方法的讨论。

3 基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法

在这一节中,将首先对基于 Deramp 处理的空时自适应处理方法进行推导。首先本文构造用于 Deramp 处理的参考函数如式(4)

$$S_{ref}(f_r, t_a; d_m) = \exp\left[j\frac{4\pi}{c}(f_c + f_r)\frac{((v - v_a)t_a + d_m)^2}{2R_b}\right] \quad (4)$$

将式(4)与式(3)相乘后并变换到方位多普勒域与空间角度域,可以得到

$$\begin{aligned}
s(f_r, f_a; \sin \theta) = & W_r(f_r) W_{az} \left(f_a + \frac{2(f_c + f_r)}{c} v_r \right. \\
& \left. - \frac{2(f_c + f_r)(v - v_a)^2 t_{ce}}{c R_b} \right) \\
& \cdot W_{an} \left(\frac{\sin \theta}{\lambda} - \frac{2(f_c + f_r)(v - v_a) t_{ce}}{c R_b} \right) \\
& \cdot \exp(j\Phi(f_r)) \exp(-j2\pi f_a t_{ce}) \quad (5)
\end{aligned}$$

其中 $\Phi(f_r) = -4\pi(f_c + f_r)(R_b - v_r t_{ce})/c - 2\pi(f_c + f_r) \cdot ((v - v_a) t_{ce})^2 / c R_b$, f_a 为多普勒频率, $\sin \theta$ 为空间角度, 由于经过 Deramp 处理后, 动目标在方位向已经得到聚焦。同时, 通道加权一般情况下是一致的, 否则可以通过补偿将各通道补偿为一致, 因此, $W_{az}(\cdot)$ 与 $W_{an}(\cdot)$ 都可以看作为一个 Sinc 函数形式。此外, 从式(5)方位窗与空间角度窗中可以发现, 动目标在空时 2 维平面中的关系为

$$f_a = \frac{(v - v_a) \sin \theta}{\lambda} - \frac{2v_r (f_c + f_r)}{c} \quad (6)$$

当式(6)中动目标速度变为零时, 即为静止杂波在空时 2 维平面中的关系

$$f_a = \frac{v \sin \theta}{\lambda} \quad (7)$$

在传统的空时 2 维平面中, 静止杂波是重合的, 动目标是在杂波的基础上发生偏移^[8]。从式(6)与式(7)中可以发现, 静止背景杂波在经过 Deramp 处理后的空时 2 维平面中沿着斜率为 v/λ 的直线排列, 与在传统空时 2 维平面中的情形类似, 值得注意的是, 由于 Deramp 处理后, 此时背景杂波已经得到了部分聚焦, 因此各背景杂波目标点的空时谱是部分重合的, 但整体依然沿着斜率为 v/λ 的直线排列, 且动目标同样是在静止杂波的基础上发生偏移, 只是此时动目标的多普勒谱得到了压缩。为了对 Deramp 处理前后动目标及背景杂波空时谱线的变化进行观察, 本文在这里做一个仿真实验。仿真系统参数见表 1, 场景中布置 3 个动目标, 其径向速度分别为 5.5 m/s, 15.5 m/s 和 25.5 m/s, 其横向速度全部设置为零。考虑方位信号下采样的情况, 本文将 PRF 设置为方位信号带宽的三分之一。图 2(a) 与图 2(b)分别给出了没有经过 Deramp 处理以及进行 Deramp 处理后动目标及背景杂波空时谱线的结果。从中可以看出, 静止背景杂波在两空时 2 维平面中分布是相同的, 均沿着斜率为 v/λ 的直线排列。背景杂波在空时 2 维平面中模糊了 3 次, 这是由于 PRF 为方位信号带宽三分之一造成的。同时, 动目标的空时谱线均在背景杂波的基础上产生平移, 在图 2(a)中 3 个动目标重合在了一起, 这是由于我们设置成这 3 个目标其径向速度产生的多普勒偏移相

表 1 系统仿真参数设置

参数	值	参数	值
波长(m)	0.03	场景中心距离(km)	500
发射信号带宽 (MHz)	50	方位向发射天线	4
脉冲重复频率(Hz)	666.7	孔径长度(m)	1
平台速度(m/s)	4000	脉冲宽度(μ s)	32
		通道个数(个)	

差 PRF 的整数倍。在图 2(b)中, 动目标在空时平面中已经得到聚焦, 不存在多普勒模糊分量, 并且可以避免发生谱卷绕现象, 这里的仿真结果与上述分析相一致。

下面将基于 Deramp 处理后的空时 2 维平面展开杂波抑制处理。将式(5)变换到方位多普勒域, 对于多通道 SAR 系统, PRF 有可能会小于方位信号带宽, 因而在每个通道中信号会产生混叠现象, 此时可以表示为

$$\begin{aligned}
s(f_r, f_a; d_m) = & \sum_{i=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} W_r(f_r) W_{az} \left(f_a - 2(f_c + f_r) \right. \\
& \cdot (v - v_a)^2 t_{ce} / c R_b \\
& \left. + 2(f_c + f_r) v_r / c + i \cdot \text{PRF} \right) \cdot w_{an}(d_m) \\
& \cdot \exp \left(j \frac{4\pi(f_c + f_r)(v - v_a) t_{ce}}{c R_b} d_m \right) \\
& \cdot \exp(j\Phi(f_r)) \exp(-j2\pi f_a t_{ce}) \quad (8)
\end{aligned}$$

其中 N 表示方位信号混叠次数, 这里假设 N 为奇数。至此, 动目标在方位多普勒维已经得到了聚焦, 动目标的导向矢量可以表示为

$$\begin{aligned}
\mathbf{a}_i(f_a, d_m) = & \exp \left(j2\pi \left[f_a + \frac{2(f_c + f_r)}{c} v_{\text{base}} \right. \right. \\
& \left. \left. + i \cdot \text{PRF} \frac{d}{(v - v_a)} \right] \right) \quad (9)
\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_M]^T$, 这里 v_{base} 定义为基带速度, 其表达式为 $v_{\text{base}} = v_r - L \cdot \text{PRF} c / 2f_c$, L 为模糊数, 基带速度的范围为 $v_{\text{base}} \in [-\lambda \text{PRF} / 4, \lambda \text{PRF} / 4]$ 。在谱压缩空时 2 维平面利用 PD-STAP 技术进行杂波抑制, 用于杂波抑制的权矢量可以由式(10)得到

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_i} & \mathbf{w}_i^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_i \\ \mathbf{w}_i^H & \mathbf{a}_i(f_a, d_m) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中协方差矩阵 $\mathbf{R}_s = E\{s(f_r, f_a; \mathbf{D})s^H(f_r, f_a; \mathbf{D})\}$, $s(f_r, f_a; \mathbf{D}) = [s(f_r, f_a; d_1), s(f_r, f_a; d_2), \dots, s(f_r, f_a; d_M)]^T$ 。杂波抑制后, 动目标的信号形式可以表示为

$$\begin{aligned}
s(f_r, f_a) = & W_r(f_r) W_{az} \left(f_a - 2(f_c + f_r)(v - v_a)^2 t_{ce} / c R_b \right. \\
& \left. + 2(f_c + f_r) v_r / c \right) \\
& \cdot \exp(j\Phi(f_r)) \exp(-j2\pi f_a t_{ce}) \quad (11)
\end{aligned}$$

为了验证杂波抑制的性能,这里利用上面的仿真参数同样做了一组仿真实验。图3(a)与图3(b)分别给出了利用传统STAP方法^[12]以及利用本文方法得到的杂波抑制后的结果。在传统STAP方法中,采用径向速度15.5 m/s进行杂波抑制,而在本文的方法中,采用基带速度-4.5 m/s进行杂波抑制。从图中可以看出,利用传统方法得到的3个动目标的多普勒谱是卷绕的,然而本文方法可以避免这一点。同时,从图3(a)中可以发现,3个动目标的多普勒平移是一致的。实际上,由于它们之间径向速度相差10 m/s,它们之间是存在一个PRF偏移的,这会导致动目标1与目标3的聚焦位置与其真实位置存在一个PRF偏移量。最终会使得同一动目标会在不同的位置被多次检测到,这对进行动目标检测是非常不利的。而本文的方法由于在Deramp后的空时平面中不存在动目标的模糊分量,因而不会出现动目标聚焦位置出错的问题。同时,由于本文方法在进行杂波抑制时只需要考虑动目标的基带速度,因而其计算复杂性可以大大减低。此外,如式(10)所示,在进行杂波抑制后,本文可以得到 N 部分独立的数据。这是由于在进行Deramp处理后的空时平面中,动目标是聚焦的,不存在模糊信号分量。因此,对于动目标而言,在杂波抑制后得到的 N 部分数据是独立的,可以分别进行处理。

对杂波抑制后的动目标进行聚焦处理可以参见文献[17]中基于Keystone变换的动目标聚焦算法,限于篇幅,这里不详细给出。在式(4)中,本文事先无法知道动目标的距离向位置 R_b 以及动目标的横

向速度 v_a 。其中距离向位置 R_b 可以采用场景中心的距离来代替,如果测绘带非常宽,可以采用分子测绘带处理的方式,用各子测绘带的中心距离代替 R_b 。式(4)中动目标横向速度 v_a 会造成动目标方向散焦。假如本文想得到完全聚焦的动目标结果,需要对式(4)中的动目标的横向速度进行遍历。然而,对于每一个遍历的速度都需要经过杂波抑制处理,我们知道杂波抑制的运算量是非常大的。为了节省运算量,本文采用重聚焦处理对动目标进行精聚焦。重聚焦函数为

$$S_{\text{focus}}(f_r, t_a) = \exp\left(-j2\pi(f_c + f_r)(vt_a)^2/cR_b\right) \cdot \exp\left(j2\pi(f_c + f_r)((v - v_a)t_a)^2/cR_b\right) \quad (12)$$

这一重聚焦过程在杂波抑制后,动目标走动校正之前执行。在式(12)中,同样需要对动目标横向速度进行遍历,遍历的间隔可以采用文献[18]中介绍的方法,在损失动目标SCNR最小的情况下,采用最少的滤波器组实现动目标的精聚焦。

4 仿真实验

在这一节中,将对本文的算法进行仿真验证,具体的系统仿真参数如表1所示,仿真中假定背景杂波的幅度服从瑞利分布,相位服从均匀分布,并在背景杂波中加入杂噪比为CNR=60 dB的高斯噪声。在背景杂波中随机放置4个动目标,动目标的参数信息如表2所示,仿真的条带SAR场景以及动目标在场景中的分布位置如图4(a)所示,图中的箭头表示动目标的位置以及动目标的运动方向。图4(b)为参考通道获得的原始场景回波的2维频谱。

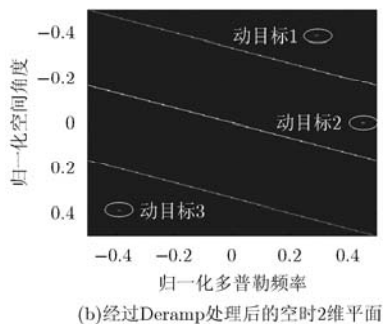
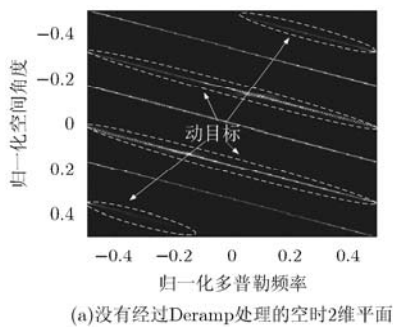


图2 空时2维平面对比

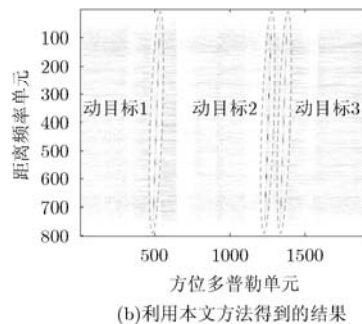
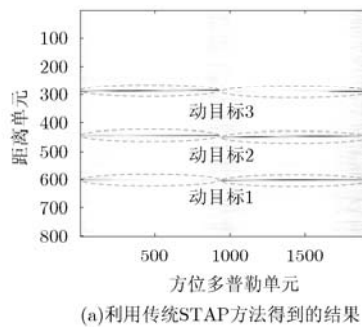


图3 杂波抑制后数据

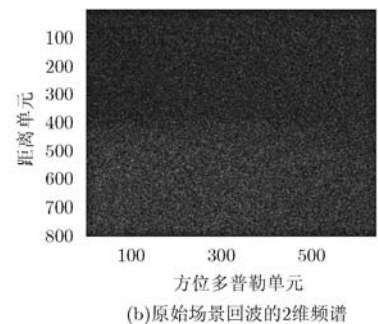
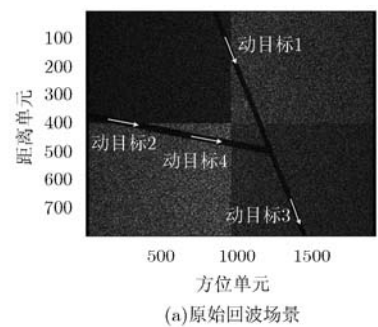


图4 仿真场景

表 2 动目标速度参数

参数	动目标 1	动目标 2	动目标 3	动目标 4
径向速度 (m/s)	5.50	15.50	25.50	15.50
横向速度 (m/s)	1.40	12.30	2.70	3.30

为验证本文所提方法的有效性，本文同传统方法进行比较。当利用传统的 STAP 方法^[12]进行杂波抑制后，对动目标进行聚焦处理得到的聚焦结果如图 5 所示。图 5(a)，图 5(b)，图 5(c)分别给出了采用 5.5 m/s, 15.5 m/s 与 25.5 m/s 进行杂波抑制后聚焦的结果。从中本文可以发现每个动目标聚焦在 3 个不同的位置，各聚焦位置存在一个 PRF 的偏移，这对进行动目标检测是非常不利的。

图 6 给出了利用本文方法统一采用动目标基带速度 - 4.5 m/s 得到杂波抑制后的结果。从中可以看出 4 个动目标在杂波抑制后均清晰可见。图 7 给出了利用本文方法进行杂波抑制后，得到的动目标聚焦结果。图 7(a)给出了方位向前 1/3 数据利用模糊数 $M_{amb} = 3$ 得到的聚焦结果，图中给出了动目标 2 局部放大图，由于这里给出的聚焦结果没有经过重聚焦处理，因而动目标在方位向存在一定的散焦。图 7(b)给出了方位向中间 1/3 数据利用模糊数 $M_{amb} = 1$ 得到的聚焦结果以及动目标 1 和动目标 4

的局部放大图，图 7(c)给出了方位向中间 1/3 数据利用模糊数 $M_{amb} = 2$ 得到的聚焦结果以及动目标 1 和动目标 4 的局部放大图，图 7(d)给出了方位向后 1/3 数据利用模糊数 $M_{amb} = 2$ 得到的聚焦结果以及动目标 3 的局部放大图。从图 7 的仿真结果可以看出利用本文的方法，只需通过动目标的基带速度 - 4.5 m/s，所有动目标包括快速以及慢速目标利用正确的模糊数均能得到良好的聚焦，不存在由于多普勒谱卷绕而导致虚假目标产生的情况，并且可以避免动目标聚焦位置错误的问题。

为验证本文所提算法的有效性，除了验证上述 3 个优点外，本文同样给出了动目标的 SCNR 同传统方法的比较实验。这里动目标 SCNR 定义为在图像域，动目标的峰值功率同杂波与噪声平均功率的比值，它可以反映动目标聚焦质量与杂波抑制性能的好坏^[4]。仿真结果如表 3 所示。表 3 中圆括号中的第 1 个数字表示用于杂波抑制动目标的径向速度，第 2 数字表示用于正确校正动目标走动的模糊数。从表中可以明显看出利用传统方法与本文提出的方法得到的动目标的 SCNR 是相似的。本文方法在拥有上述 3 个优点外，这个仿真实验验证了本文所提方法同传统 STAP 方法抑制杂波的性能相当。

5 结束语

本文提出了一种基于 Deramp 处理的空时自适

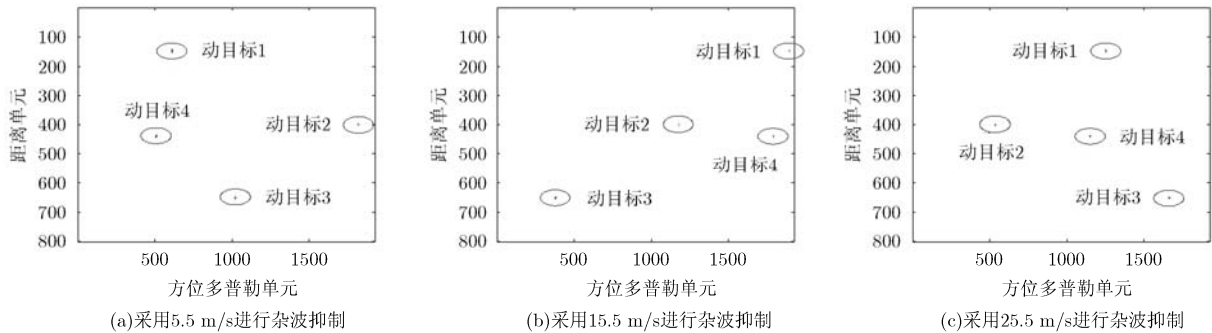


图 5 动目标聚焦结果

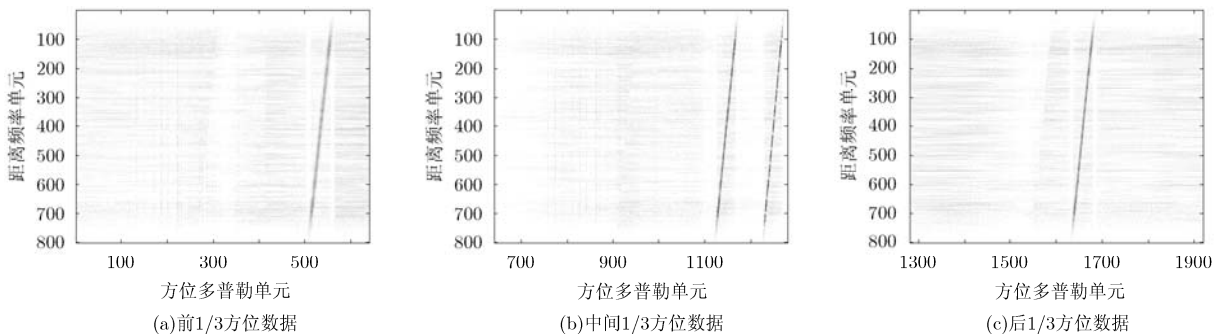


图 6 采用本文方法得到杂波抑制后的结果

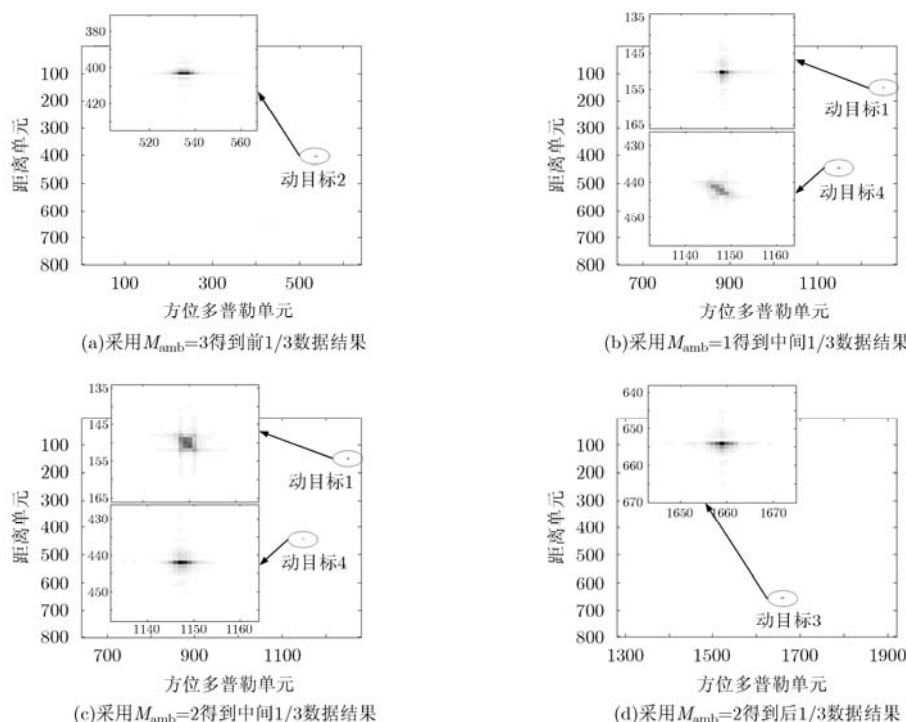


图7 利用本文方法得到的动目标聚焦结果

表3 利用两种方法得到的动目标的 SCNR

SCNR(dB)	动目标 1	动目标 2	动目标 3	动目标 4
传统方法	36.01 (5.5 m/s,0)	27.96(15.5 m/s,1)	32.21(25.5 m/s,1)	32.18(15.5 m/s,1)
本文方法	36.15(-4.5 m/s,1)	27.74(-4.5 m/s,3)	32.46(-4.5 m/s,2)	32.47(-4.5 m/s,2)

应处理方法,其可以避免由于动目标谱卷绕而造成虚假目标产生的情况。在方位信号下采样的情况下,采用传统的 STAP 方法进行杂波抑制时,会导致动目标的聚焦位置出现错误,而本文所提方法由于动目标的多普勒谱得到了压缩,不存在动目标模糊分量,从而可以避免动目标聚焦位置出现错误的问题。此外,利用本文的方法,在进行杂波抑制时只需考虑基带范围内的速度,大大降低了杂波抑制处理的复杂性。最后,通过仿真实验验证了本文所提算法的有效性。

参考文献

- [1] Dragosevic M V, Burwash W, and Chiu S. Detection and estimation with RADARSAT-2 moving-object detection experiment modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3527-3543.
- [2] Sikaneta I C and Gierull C H. Adaptive CFAR for space-based multichannel SAR-GMTI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12): 5004-5013.
- [3] Baumgartner S V and Krieger G. Fast GMTI algorithm for traffic monitoring based on a priori knowledge[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4626-4641.
- [4] Cristallini D, Pastina D, Colone F, et al. Efficient detection and imaging of moving targets in SAR images based on chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 2403-2416.
- [5] 郑世超, 宋红军, 刘亚波, 等. 广域监视动目标检测模式下动目标快速定位误差分析[J]. *雷达学报*, 2103, 2(4): 445-453. Zheng Shi-chao, Song Hong-jun, Liu Ya-bo et al. Error analysis of fast moving target Geo-location in wide area surveillance ground moving target indication mode[J]. *Journal of Radars*, 2103, 2(4): 445-453.
- [6] Lightstone L, Faubert D, and Rempel G. Multiple phase center DPCA for airborne radar[C]. Proceedings of the IEEE National Radar Conference, Los Angeles, USA, 1991: 36-40.
- [7] Gierull C H. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 691-701.
- [8] Ender J H G. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1999, 11(1): 29-38.

- [9] Wu W B. Fourier transforms of stationary processes[J]. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 2004, 133(1): 285-293.
- [10] Cristallini D, Colone F, Pastina D, *et al.*. Integrated clutter cancellation and high-resolution imaging of moving targets in multichannel SAR[C]. *Proceedings of the 6th European Radar Conference*, Rome, Italy, 2009: 57-60.
- [11] Cerutti-Maori D and Sikaneta I. Optimum GMTI processing for spacebased SAR/GMTI systems—theoretical derivation [C]. *Proceedings of the 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Aachen, German, 2010: 390-393.
- [12] Cerutti-Maori D, Sikaneta I, and Gierull C. H. Optimum SAR/GMTI processing and its application to the radar satellite RADARSAT-2 for traffic monitoring[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(10): 3868-3881.
- [13] 邓云凯, 刘亚东, 行坤, 等. 一种结合时频分析与 Dechirp 技术提高运动目标参数估计精度的多通道方法[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 14-20.
Deng Yun-kai, Liu Ya-dong, Xing Kun, *et al.*. A high accurate method of estimating moving target's parameters using time-frequency analysis and Dechirp technology with multi-channel[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(1): 14-20.
- [14] 张丹丹, 仇晓兰, 胡东辉, 等. 基于运动目标检测的同步轨道星-空双站 SAR 杂波特性分析[J]. *雷达学报*, 2013, 2(3): 348-356.
Zhang Dan-dan, Qiu Xiao-lan, Hu Dong-hui, *et al.*. Analysis of geosynchronous satellite-air bistatic SAR clutter characteristics from the viewpoint of ground moving target indication[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 348-356.
- [15] 常玉林, 周红, 黄晓涛, 等. 多通道 SAR 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 方法[J]. *电子学报*, 2011, 39(6): 1245-1252.
Chang Yu-lin, Zhou Hong, Huang Xiao-tao, *et al.*. Frequency-doppler domain wideband long CPI STAP method for multichannel SAR system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1245-1252.
- [16] Sun G, Xing M, Xia X G, *et al.*. Robust ground moving target imaging using deramp-keystone processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 966-982.
- [17] Zhu S Q, Liao G S, Qu Y, *et al.*. A new slant range velocity ambiguity resolving approach of fast moving targets for SAR system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 432-451.
- [18] Xia X G, Wang G Y, and Chen V C. Quantitative SNR analysis for ISAR imaging using joint time-frequency analysis—short time Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 649-659.
- 李学仕: 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像及动目标检测。
- 孙光才: 男, 1984 年生, 讲师, 博士, 研究方向为新体制 SAR 成像及动目标检测。
- 邢孟道: 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和模式识别等。