

## 改进混合积累的单通道机载 SAR 高径向速度目标检测方法

许睿鹏<sup>\*①②③</sup> 胡东辉<sup>①③</sup> 丁赤彪<sup>①③</sup> 张丹丹<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100190)

<sup>③</sup>(中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室 北京 100190)

**摘要:** 高径向速度目标会产生严重的距离走动并伴随方位失配, 方位压缩会使其散焦并弥散在 SAR 图像中, 不易被检测。该文针对高径向速度目标的检测问题, 提出一种基于单通道机载 SAR 的检测方法。该方法通过抽取等效双通道, 利用相干对消抑制杂波, 并去除动目标的频谱分裂, 再运用 Dechirp 处理和 Hough 变换积累目标在距离单元内和距离单元间的能量, 以获得更大的积累增益。与传统的混合积累方法相比, 该方法在抑制杂波的基础上, 更好地积累高径向速度目标的能量, 从而有效提高该类目标的检测性能。仿真数据和实测数据均验证了该方法的有效性和优越性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 动目标检测; 高速径向速度; 单通道; 改进混合积累

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)07-1623-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01367

## Improved Hybrid Integration Detection Algorithm of Moving Targets with Fast Radial Velocity Based on Single-channel SAR System

Xu Rui-peng<sup>\*①②③</sup> Hu Dong-hui<sup>①③</sup> Ding Chi-biao<sup>①③</sup> Zhang Dan-dan<sup>①②③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>③</sup>(Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Moving targets are smeared and defocused in SAR images by the series range walk and azimuth mismatch which are caused by the fast radial velocity, so it is difficult to detect them. A novel detection scheme is proposed via the airborne single-channel SAR data. The dual-channel can be retrieved by desampling the airborne SAR data in the azimuth direction. Stationary targets and the spectrum splitting of moving targets can be eliminated by coherent subtracting of the dual-channel data. Moreover, moving targets amplitude are double. Then, the Dechirp processing and Hough transform can be applied to accumulate the energy of moving targets. As a result, the integration gain is improved significantly. Comparing with the traditional hybrid integration approach, the proposed scheme can eliminate the clutter and collect the energy of moving targets. The effectiveness and superiority of the proposed scheme are demonstrated by the simulated and real data.

**Key words:** SAR; Moving target detection; Fast radial velocity; Single-channel; Improved hybrid integration

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)常用于对地面静止场景成像, 但根据军事侦查与战场指挥的需要, 获取场景中的运动目标具有重要的军事意义。因此, 动目标检测和成像已成为 SAR 信号处理领域的一个重要发展方向。

在 SAR 动目标检测领域, 目前有单通道<sup>[1-3]</sup>和多通道两大类<sup>[4-8]</sup>方法。单通道检测方法主要包括

频域滤波法<sup>[1]</sup>, 图像序列法<sup>[2]</sup>等; 多通道检测方法主要包括相位中心偏置天线(DPCA)技术<sup>[4]</sup>、沿轨干涉(ATI)技术<sup>[5]</sup>、空时自适应处理(STAP)技术<sup>[6,7]</sup>以及协方差矩阵特征值分解技术<sup>[8]</sup>等, 这两类方法主要解决的是杂波抑制问题。为了能够更有效地提高运动目标的检测能力, 在消除杂波的同时, 还需要进一步聚集动目标能量。典型方法是采用 2 维脉冲压缩技术。但具有较高径向速度的目标包络通常会跨越多个距离单元并伴随频谱分裂, 方位压缩不能聚集动目标的能量, 往往使得其淹没在噪声和残余杂波

中而无法被检测。文献[9]的研究结果表明动目标在不同子视中的信号存在差异,因此多视处理对动目标能量的积累效果欠佳。文献[10]提出了将动目标数据在方位向划分成多个相干处理单元(Coherent Processing Intervals, CPI),在每个CPI内进行傅里叶变换,实现距离单元内的相干积累,再利用Hough变换完成跨越多个距离单元的非相干积累。通过相干和非相干积累来聚集动目标的能量,但该方法忽视了3个问题:(1)没有结合相应的杂波抑制方法;(2)CPI内信号带宽对相干积累的影响;(3)距离弯曲对非相干积累的影响。这3个问题将限制该方法的检测性能。

针对上述问题,本文提出了一种改进混合积累的单通道机载SAR高径向速度目标检测方法,该方法运用了一种新的杂波抑制技术,该技术不但能够抑制杂波,还能消除动目标的频谱分裂,在此基础上进行距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC),消除目标的距离弯曲和部分距离走动,残余距离走动使得目标包络呈一条直线。然后将数据沿方位向划分为若干个CPI,在每个CPI内通过Dechirp处理进行距离单元内相干积累,再利用Hough变换完成距离单元间的非相干积累。与传统的混合积累方法<sup>[10]</sup>相比,本文进行了杂波抑制,并用Dechirp处理代替傅里叶变换,提高了相干积累能力。校正了距离弯曲,使非相干积累的性能得以优化。可见本方法具有更强的检测能力。仿真和实测数据均验证了本方法的有效性和优越性。

## 2 改进的混合积累检测方法

### 2.1 单通道机载SAR杂波抑制技术

图1给出了正侧视机载SAR的几何关系图。载机飞行速度为 $v_a$ ,黑色点表示目标在波束中心照射时的位置( $\eta_m = 0$ )。 $\eta_m$ 表示离散慢时间。目标径向和方位向速度分别为 $v_r$ 和 $v_x$ 。 $R_0$ 和 $R(\eta_m)$ 分别表示目标与载机的最近斜距和瞬时斜距。

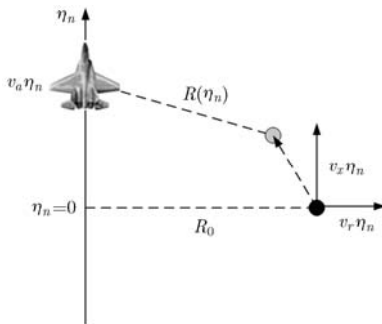


图1 回波几何模型

雷达到运动目标的瞬时斜距可表示为

$$R(\eta_m) = \sqrt{(v_a \eta_m - v_x \eta_m)^2 + (R_0 + v_r \eta_m)^2} \approx R_0 + v_r \eta_m + \frac{(v_a - v_x)^2}{2R_0} \eta_m^2 \quad (1)$$

经过距离压缩后的回波信号表示为

$$S(\tau, \eta_m) = A_0 w_a(\eta_m) \text{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m) \right] \quad (2)$$

其中 $w_a(\cdot)$ 表示方位向包络, $\tau$ 表示快时间, $A_0$ 表示任意复常数, $B_w$ 为发射信号带宽, $\lambda$ 表示载波波长。

文献[11]分析了目标运动对极化SAR图像的影响。研究表明在满足互异性假设的前提下,可利用两个交叉极化(HV和VH)图像之间的关系进行杂波抑制和动目标检测。本文将该思路引入到单通道SAR系统中,提出了一种单通道杂波抑制技术,该技术不但可以抑制杂波还能够消除动目标的频谱分裂,下文将对该技术进行详细说明。

在机载SAR系统中,假设脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)是方位向带宽的2~3倍,可对数据在方位向进行2抽1,将单通道等效成双通道。

抽取后的通道1和通道2的信号可分别表示为

$$S_{\eta_1}(\tau, \eta_m) = A_0 w_a(\eta_m) \text{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m) \right] \quad (3)$$

$$S_{\eta_2}(\tau, \eta_m + \Delta\eta) = A_0 w_a(\eta_m + \Delta\eta) \cdot \text{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m + \Delta\eta)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m + \Delta\eta) \right] \quad (4)$$

其中 $\eta_m$ 表示抽取后的离散慢时间( $m = 2n$ ); $\Delta\eta$ 表示脉冲重复时间(Pulse Repetition Time)。

对通道2的信号进行插值得

$$S_{\eta_2}(\tau, \eta_m) = \sum_i k_i S_{\eta_2}(\tau, \eta_m + i\Delta\eta) = \sum_i k_i A_0 w_a(\eta_m + i\Delta\eta) \cdot \text{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m + i\Delta\eta)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m + i\Delta\eta) \right] \quad (5)$$

其中 $k_i$ 表示插值核函数, $i = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots$ 。

对式(5)的斜距 $R(\cdot)$ 进行泰勒展开可得

$$\begin{aligned}
S_{r_2}(\tau, \eta_m) &\approx \sum_i k_i A_0 w_a(\eta_m) \operatorname{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m)}{c} \right) \right] \\
&\quad \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m) \right] \\
&\quad \cdot \exp \left[ \left( v_r + \frac{(v_a - v_x)^2}{R_0} \eta_m \right) \cdot i \cdot \Delta\eta \right] \\
&= S_{r_1}(\tau, \eta_m) F_{\text{mov}}(\eta_m)
\end{aligned} \quad (6)$$

其中  $F_{\text{sta}}(\eta_m)$  和  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  分别定义为静止目标和运动目标的传递函数, 它们表示为

$$\begin{aligned}
&F_{\text{mov}}(\tau, \eta_m) \\
&= \sum_i k_i \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left( v_r + \frac{(v_a - v_x)^2}{R_0} \eta_m \right) \cdot i \cdot \Delta\eta \right] \\
&F_{\text{sta}}(\tau, \eta_m) = \sum_i k_i \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left( \frac{v_a^2}{R_0} \eta_m \right) \cdot i \cdot \Delta\eta \right]
\end{aligned} \quad (7)$$

对于静止目标, 插值后两个通道的信号是一致的, 故  $F_{\text{sta}}(\eta_m) \approx 1$ 。

由于插值核函数  $k_i$  为偶函数<sup>[12]</sup>, 因此可把  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  和  $F_{\text{sta}}(\eta_m)$  简化为

$$\begin{aligned}
F_{\text{mov}}(\eta_m) &= 2 \sum_l k_l \cos(2\pi f_{dc} \cdot l \cdot \Delta\eta - 2\pi K_{am} \eta_m \cdot l \cdot \Delta\eta) \\
F_{\text{sta}}(\eta_m) &= 2 \sum_l k_l \cos(2\pi K_a \eta_m \cdot l \cdot \Delta\eta) \approx 1
\end{aligned} \quad (8)$$

其中  $l = 1, 3, 5, \dots$ ;  $f_{dc} = -2v_r/\lambda$  和  $K_{am} = 2(v_a - v_x)^2/\lambda R_0$  分别表示运动目标真实的多普勒中心频率和多普勒调频率,  $K_a = 2v_a^2/\lambda R_0$  表示静止目标的多普勒调频率。

由式(8)可知,  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  比  $F_{\text{sta}}(\eta_m)$  多出了一项与径向速度有关的相位, 因此  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  将会受到径向速度的影响, 下面将对此进行讨论。

情况 1: 当  $2\pi f_{dc} \Delta\eta = \pi(2M - 1)$  时 ( $M$  表示任意整数),  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  可简化为

$$F_{\text{mov}}(\eta_m) = -2 \sum_l k_l \cos(2\pi K_{am} \eta_m \cdot l \cdot \Delta\eta) \approx -F_{\text{sta}}(\eta_m) \quad (9)$$

将式(9)代入式(6)可得

$$S_{r_2}(\tau, \eta_m) \approx -S_{r_1}(\tau, \eta_m) \quad (10)$$

情况 2: 当  $2\pi f_{dc} \Delta\eta = 2\pi M$  时,  $F_{\text{mov}}(\eta_m)$  可简化为

$$F_{\text{mov}}(\eta_m) = 2 \sum_l k_l \cos(2\pi K_{am} \eta_m l \Delta\eta) \approx F_{\text{sta}}(\eta_m) \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)可得

$$S_{r_2}(\tau, \eta_m) \approx S_{r_1}(\tau, \eta_m) \quad (12)$$

通过对以上两种情况的分析, 可将抽取后的模糊数 ( $N = 2 \cdot f_{dc}/\text{PRF}$ ) 与  $M$  的关系表示为

$$N = \begin{cases} 2M - 1, & \text{情况1} \\ 2M, & \text{情况2} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 当目标频谱处于奇数次模糊时, 目标在两通道内的信号幅度相同, 相位相差  $\pi$ , 进行相干对消会使其幅度增大为原来的 2 倍; 而当目标频谱处于偶数次模糊时, 其在两通道内的信号幅度和相位均一致, 相干对消会将其消除。在正侧视情况下, 杂波频谱位于模糊数为 0 的区域内, 相干对消即可完成杂波抑制。而对处在奇数次模糊内的动目标信号, 在对消后幅度将变为原来的 2 倍。本文正是利用了上述特性来消除杂波和动目标的频谱分裂。

## 2.2 距离徙动校正

由于 RCMC 不能区分不同的模糊数, 因而当目标频谱分布在两个模糊数之间时, 进行 RCMC 将使目标频谱变成两条斜率不同的直线, 不利于动目标能量的积累。为规避该问题, 传统的混合积累方法不得不忽略距离弯曲所造成的影响, 将目标包络近似看成一条直线, 然而在高分辨率情况下, 这将牺牲非相干积累的增益。上一节提出了一种杂波抑制技术, 该技术可在抑制杂波的同时消除分裂频谱, 使得动目标包络在距离多普勒域呈一条线, 此时就可通过 RCMC 校正距离弯曲, 以确保非相干积累的增益。

当运动目标存在奇数次模糊时, 经过杂波抑制后的信号可表示为

$$\begin{aligned}
S_{r_{12}}(\tau, \eta_m) &= S_{r_1}(\tau, \eta_m) - S_{r_2}(\tau, \eta_m) \\
&= 2A_0 w_a(\eta_m) \operatorname{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R(\eta_m)}{c} \right) \right] \\
&\quad \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(\eta_m) \right]
\end{aligned} \quad (14)$$

经过 RCMC 后的 2 维时域信号可表示为

$$\begin{aligned}
S_{r_{12}}(\tau, \eta_m) &\approx 2A_0 w_a(\eta_m) \\
&\quad \cdot \operatorname{sinc} \left[ \pi B_w \left( \tau - \frac{2R_0}{c} + \frac{N \cdot \text{PRF}}{2f_0} \eta_m \right) \right] \\
&\quad \cdot \exp \left[ -j \frac{4\pi R_0}{\lambda} + 2\pi f_{dc} \eta_m - \pi K_{am} \eta_m^2 \right]
\end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可见, 距离弯曲已经校正, 当目标存在一定的径向速度时, 动目标的频谱会产生多普勒模糊 ( $N \neq 0$ ), 这将导致残余部分距离走动。在 2 维时域, 残余距离走动会使目标包络呈一条直线。

## 2.3 基于 Dechirp 处理的相干积累

文献[10]通过将动目标信号划分为若干个 CPI, 在 CPI 内利用傅里叶变换来累积目标能量, 然而当 CPI 内信号带宽大于频率分辨率时, 积累增益将受到限制。本文使用 Dechirp 处理来代替傅里叶变换,

可在上述情况下确保相干积累的增益。

对 CPI 内的信号进行 Dechirp 处理, 去除载机运动产生的多普勒调频率, 再进行傅里叶变换积累动目标能量。该过程可用式(16)表示:

$$S_{\eta_2}(\tau, \text{CPI}_{\text{num}}) = \text{FT} \left[ S_{\eta_2}(\tau, \eta_m) \cdot \exp(j\pi K_a \eta_m^2) \right], \quad (16)$$

$$\text{num} = 1, 2, 3, \dots, P$$

$\text{CPI}_{\text{num}}$  表示第 num 个 CPI,  $P$  表示 CPI 的个数,  $\text{FT}(\cdot)$  表示傅里叶变换。

若所处理的 CPI 内存在运动目标, 其在频域内会出现一个峰值, 设定第 1 门限实现 CPI 内的检测。

## 2.4 基于 Hough 变换的非相干积累

由式(15)可知, 在 2 维时域中, 运动目标包络呈一条直线。通过 Dechirp 处理以及第 1 门限检测, 其点迹仍呈一条直线, 因此可利用 Hough 变换对跨越多个距离单元的点迹进行非相干积累。下面对 Hough 变换进行简要的介绍。

图像空间中的直线用极坐标形式可以表示为

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (17)$$

图像空间中的一个点对应了  $\rho\theta$  参数空间中一条直线, 那么图像空间中一条直线上的所有点, 它们的斜率和截距是相同的, 所以它们对应在  $\rho\theta$  参数空间中的同一个点(如图2)。

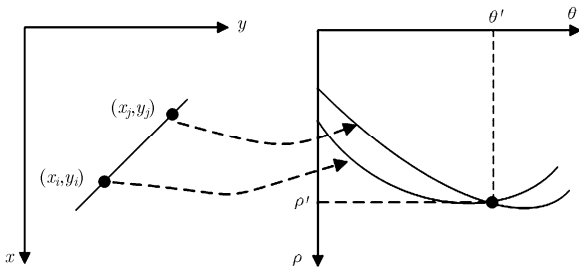


图2 Hough 变换的基本原理

对经过第 1 门限判别后的点迹图进行 Hough 变换, 通过设定第 2 门限进行动目标检测, 其表示为

$$S = \text{HT}(S_{\eta_2}(\tau, \text{CPI}_{\text{num}})) \begin{cases} \geq K, & \text{有目标} \\ < K, & \text{无目标} \end{cases} \quad (18)$$

其中  $\text{HT}(S_{\eta_2}(\tau, \text{CPI}_{\text{num}}))$  表示对  $S_{\eta_2}(\tau, \text{CPI}_{\text{num}})$  做 Hough 变换;  $K$  表示第 2 门限。  $S$  表示检测结果。

图 3 给出了本文算法的流程图, 具体操作步骤归纳如下: (1)将 SAR 原始数据进行距离压缩, 并对方位向数据进行 2 抽 1, 得到两个通道的数据; (2)对通道 2 的数据进行插值, 并与通道 1 进行相干对消。通过相干对消抑制静止杂波, 保留并提高动目标信号幅度; (3)对杂波抑制后的信号进行 RCMC, 保证目标包络呈一条直线; (4)在方位向将动目标信号分成多个 CPI, 并分别进行 Dechirp 处理, 积累

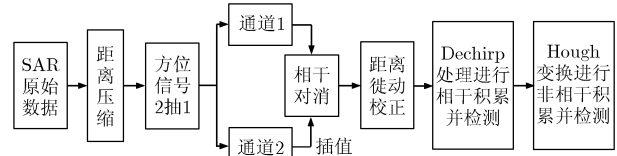


图3 本文算法流程图

动目标能量, 通过设定第 1 门限实现 CPI 内的检测; (5)第 1 门限检测后可以得到一幅 2 维点迹图, 对其进行 Hough 变换, 检测运动目标。

## 3 数据处理分析与验证

**仿真实验** 在实验中, 添加了 2 个径向和方位向速度均不相同的运动目标以及 1 个静止目标(目标运动参数见表 1), 以验证本文算法的有效性和优越性。系统仿真参数如下: 场景中心斜距为 12 km, 载机速度为 120 m/s, 载频为 10 GHz, 信号带宽为 150 MHz, 天线孔径 0.6 m, 脉冲重复频率 900 Hz。

距离压缩后的信噪比为 2.5 dB, 检测的速度范围为  $[-v_{r, \max}, v_{r, \max}]$ ,  $v_{r, \max} = 20$  m/s, 可计算得到每个 CPI 内包含的脉冲数为 18 个<sup>[10]</sup>, 场景内共包含 CPI 的数目为 135 个, 合成孔径时间内的 CPI 数目为 120 个。

表1 运动目标参数

目标	径向速度(m/s)	方位向速度(m/s)
运动目标 1	6	5
运动目标 2	16	10
静止目标 3	0	0

图 4(a)和 4(b)分别为杂波抑制前后的距离多普勒域图, 对比两图可知, 通过杂波抑制, 不但可以去除静止目标(目标 3), 而且还消除了目标 1 的分裂频谱。这验证了本文方法在抑制杂波和去除分裂频谱方面的有效性。图 4(c)为采用频域滤波法进行杂波抑制, 并利用方位压缩聚集动目标能量的结果。图中可以看出, 频域滤波法抑制了杂波, 但并没有解决目标 1 频谱分裂问题, 导致该目标在成像后产生鬼影, 这不但分散了目标的能量, 而且对于高信杂比目标易于产生虚警。另外由于目标 2 存在较大的径向和方位向速度, 方位压缩不能有效聚集该目标的能量, 因此其被淹没在噪声中。图 4(d)为采用本文的杂波抑制技术并结合方位压缩的结果, 对比图 4(c)可知, 虽然本文的杂波抑制技术可以去除频谱分裂, 消除目标 1 在成像后的鬼影现象, 但是方位压缩仍无法聚集动目标能量。

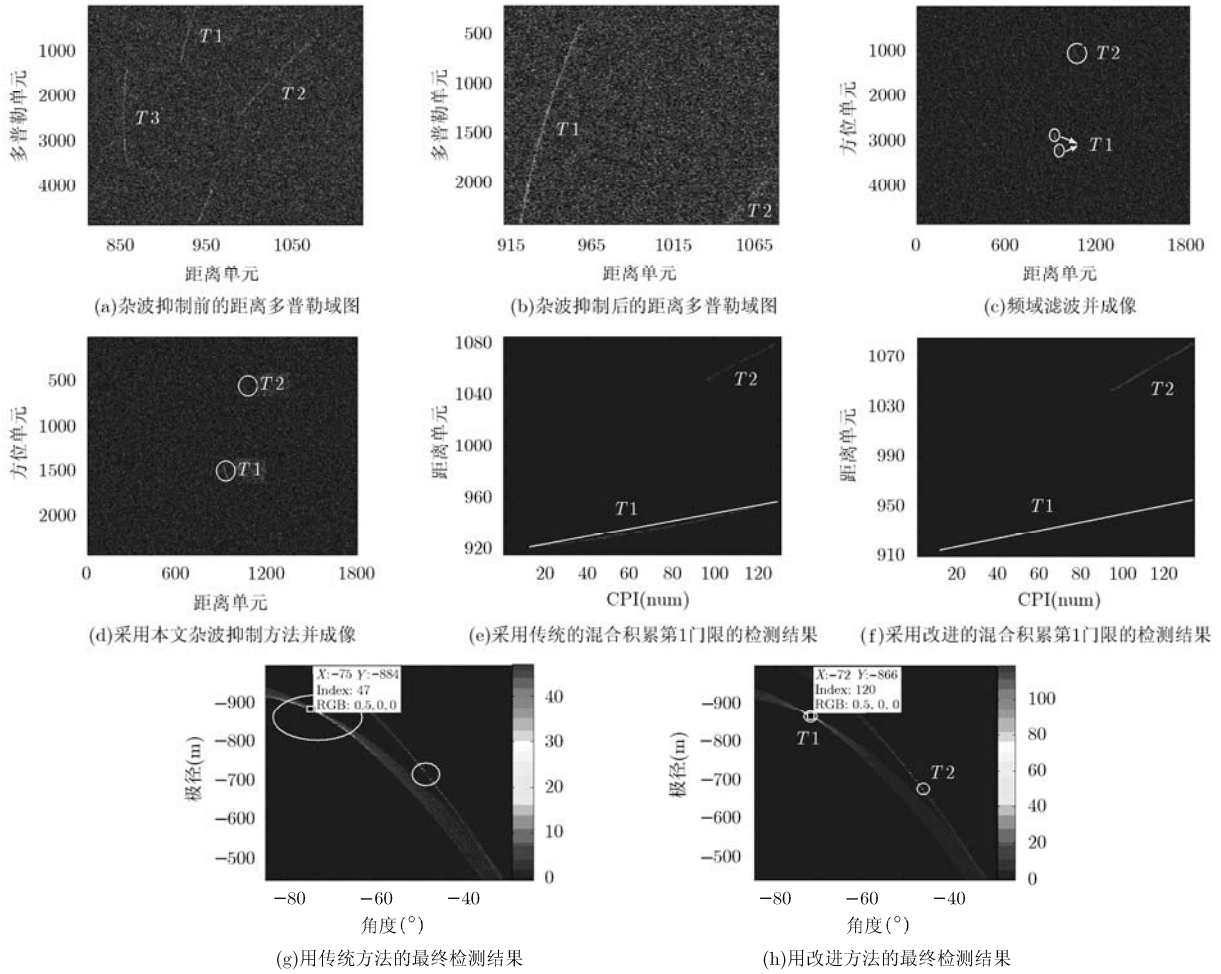


图 4 仿真实验结果

图 4(e)和 4(f)分别为采用传统和改进混合积累方法的第 1 门限检测结果(两种方法设置相同的第 1 门限),两种方法均可正确检测目标包络。这说明传统和改进的混合积累方法在能量积累方面要优于方位压缩。图 4(g)和 4(h)分别为对图 4(e)和 4(f)进行 Hough 变换的结果。由于传统的混合积累方法没有进行 RCMC,第 1 门限检测后,目标包络存在距离弯曲(如图 4(e)中目标 1 的包络),导致在变换后动目标能量分散到多个角度分辨单元中,故非相干积累能力较弱,如图 4(g)所示目标 1 峰值幅度为 47(表示图 4(e)中目标 1 的包络最多有 47 个像素聚集到了图 4(g)的某个角度上)。采用改进方法在消除分裂频谱的前提下,通过 RCMC 有效地消除距离弯曲,因此 Hough 变换能够较好地聚集动目标能量,如图 4(h)所示,目标 1 的能量更为集中,其峰值幅度也提高至 120,这说明改进方法具有更强的非相干积累能力。

通过上述仿真实验可知,针对高径向速度目标

的能量积累问题,传统和改进的混合积累方法比方位压缩方法提供更高的积累增益,故可更好地检测该类目标。另外,通过对比传统的混合积累方法和改进方法发现,后者能够提供更高的非相干积累增益。下一节将通过实测数据说明传统的混合积累方法和改进方法在相干积累方面的差异。

**实测数据** 处理的数据是某研究所录取的正侧视机载 SAR 数据,载机高度 4916 m,近斜距为 6000 m,载机速度为 110 m/s,载频为 8.85 GHz,信号带宽为 40 MHz,采样频率为 60 MHz。脉冲重复频率为 1000 Hz,使用 RD 算法进行成像,SAR 成像结果如图 5(a)。图像中的两个目标分别表示为  $T1$  和  $T2$ ,其中  $T1$  是径向速度较低的合作目标(其径向速度约为  $5.8 \text{ m/s}^{[13]}$ ), $T2$  是人为加入的目标,其径向和方位向速度分别为  $-25 \text{ m/s}$  和  $5 \text{ m/s}$ 。

假设检测的速度范围为  $[-v_{r,max}, v_{r,max}]$ ,  $v_{r,max} = 25 \text{ m/s}$ ,每个 CPI 内包含的脉冲数为 50 个,场景内共包含 CPI 的数目为 61 个,合成孔径时间内的

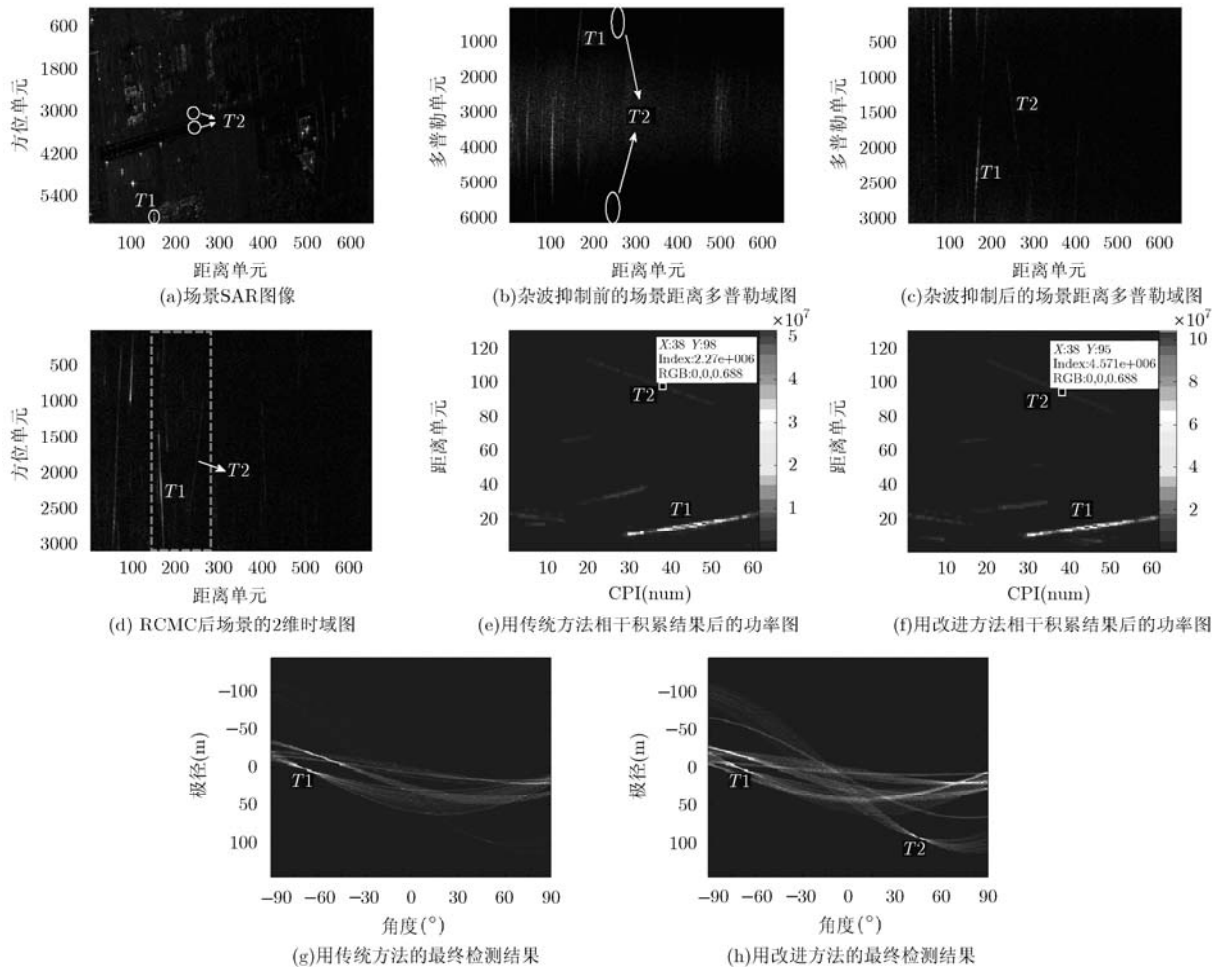


图5 实测数据处理结果

CPI 数目为 30 个。

图 5(b)和 5(c)分别为杂波抑制前后的距离多普勒域图,对比两图可知,在杂波抑制后,两个目标的信杂比均有所提高,因此动目标的视觉效果较抑制前更好。其中目标 1 的包络可较为清晰地观测,但由于目标 2 的能量较小,其包络仍很难被检测。图 5(d)为 RCMC 之后场景的 2 维时域图。虚线框(距离向: 150-280 像素)表示所截取的数据,分别使用传统的混合积累方法和改进方法进行相干积累,结果如图 5(e)和 5(f)。对比两图中目标 1 的功率值可知,使用改进方法能够更好地积累目标能量,提高信噪比。若使用相同的第 1 门限进行检测,传统方法易于产生漏警。图 5(g)和 5(h)分别为传统和改进方法最终的检测结果,由两图可见,两种方法均可检测到能量较高的目标 1。然而对于能量较弱的目标 2 而言,改进方法的检测结果明显好于传统的混合积累方法。主要原因有两方面:(1)改进方法通过杂波抑制使动目标的幅度变为原来的 2 倍;(2)通过计算可得到 CPI 内的信号带宽为 12 Hz,而频率分

辨率为 10 Hz,对于相干积累而言,使用 Dechirp 处理要优于傅里叶变换。故在第 1 检测门限相同的情况下,改进方法能够检测到目标 2 的包络而传统方法不能。最后,可利用 Hough 变换进一步积累目标 2 的能量,并对其检测。实测数据验证了改进方法较传统方法在相干积累能力方面的优势。

#### 4 结论

本文针对高径向速度目标的检测问题提出了一种基于单通道机载 SAR 的解决方法。该方法通过方位向抽取等效成两个通道,利用相干对消抑制杂波,并消除动目标的频谱分裂。之后通过 RCMC 去除距离弯曲。再将数据沿方位向划分成若干个 CPI,在每个 CPI 内采用 Dechirp 处理对距离单元内的目标能量进行相干积累,在距离单元之间利用 Hough 变换进行非相干能量积累。本文所提出的方法不但可以有效抑制杂波还能提高高径向速度目标的积累增益,改善其检测性能,通过仿真数据和实测数据证明了本方法的有效性和优越性。

## 参 考 文 献

- [1] Freeman A and Currie A. Synthetic aperture radar images of moving targets [J]. *GEC Journal of Research*, 1987, 5(2): 106-115.
- [2] Kirscht M. Detection and imaging of arbitrary moving targets with single-channel SAR [J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(1): 1984-1992.
- [3] 许睿鹏, 仇晓兰, 胡东辉, 等. 一种基于散焦偏移差的全带宽机载 SAR 动目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(10): 2336-2341.  
Xu Rui-peng, Qiu Xiao-lan, Hu dong-hui, *et al.*. An airborne single-channel SAR-GMTI method based on defocusing shifted difference [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2336-2341.
- [4] Wang H S C. Mainlobe clutter cancellation by DPCA for space-based radars [C]. *IEEE Aerospace Applications Conference Digest*, Crested Butte, USA, 1991: 1-10.
- [5] Chapin E and Chen C W. Along-track interferometry for ground moving target indication [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, 24(4): 13-18.
- [6] Maori D C, Gierull C H, and Ender J H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2066-2075.
- [7] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, Zhou Zheng-guang, *et al.*. Robust moving targets detection and velocity estimation using multi-channel and multi-look SAR images [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(6): 2009-2019.
- [8] 田斌, 朱岱寅, 朱兆达. 利用样本协方差矩阵特征值分解实现双通道 SAR 动目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(11): 2636-2641.  
Tian Bin, Zhu Dai-yin, and Zhu Zhao-da. Dual channels SAR ground moving target detection with eigen-decomposition of the sample covariance matrix [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2636-2641.
- [9] Ouchi K. On the multilook images of moving targets by synthetic aperture radars [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1985, 33(3): 823-827.
- [10] 李刚, 许稼, 彭应宁, 等. 基于混合积累的 SAR 微弱运动目标检测[J]. *电子学报*, 2007, 35(3): 576-579.  
Li Gang, Xu Jia, Peng Ying-ning, *et al.*. SAR weak moving target detection based on hybrid integration [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 576-579.
- [11] Mattar K E, Liu Chen, and Sabry R. Polarimetric SAR interferometry investigations using EC CV-580 SAR data [R]. *Defense R&D Canada-Ottawa Technical Report*, 2005.
- [12] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithm and Implementation* [M]. New York, Artech House, 2007: 51-55.
- [13] Lv Xiao-lei, Qian Jiang, Xing Meng-dao, *et al.*. Results from an airborne tri-channel SAR-GMTI experiment [C]. *EUSAR Conference*, Friedrichshafen, Germany, 2008: 69-72.
- 许睿鹏: 男, 1985 年生, 博士, 从事 SAR 运动目标检测研究工作.
- 胡东辉: 男, 1970 年生, 硕士, 副研究员, 从事 SAR/ISAR 成像研究工作.
- 丁赤飏: 男, 1969 年生, 博士, 研究员, 从事 SAR 地面系统处理工作.
- 张丹丹: 女, 1986 年生, 硕博连读生, 从事空时自适应处理研究工作.