

顺轨三频三孔径星载 SAR 的运动目标检测及定位方法研究

尹建凤^{①②③} 李道京^{①②} 吴一戎^{①②}

^①(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 杂波背景下, 传统的多通道 SAR 运动目标检测方法在杂波对消后即实施目标检测, 并不考虑目标的距离徙动校正, 这种做法会丢失某些快速目标, 虽能够检测到速度不是特别快的目标, 却可能存在测速模糊, 难以对其准确定位。对此, 该文提出用 3 频 3 孔径 SAR 解决杂波对消后快速目标的多普勒模糊问题, 并用双频共轭处理(DFCP)和 Keystone 变换对动目标解多普勒模糊、进行距离徙动校正, 提高信噪比, 进而实现对目标的检测、无模糊测速和定位。该方法在可获得与其他方法相当定位精度的同时, 扩大了可检测和定位的目标的速度范围。仿真结果证明了该文方法的有效性。

关键词: 运动目标检测; 合成孔径雷达; 快速目标检测; 定位

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0902-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00455

Research on the Method of Moving Target Detection and Location with Three-Frequency Three-Aperture Along-Track Spaceborne SAR

Yin Jian-feng^{①②③} Li Dao-jing^{①②} Wu Yi-rong^{①②}

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the case of clutter, conventional multi-channel SAR (Synthetic Aperture Radar) executes moving target detection immediately after clutter cancellation, and the influence of range migration is ignored. However, this approach may lose some fast target. The target that not so fast can be detected, but the estimated velocity may be ambiguous, and target accurate location becomes even difficult. So three-frequency three-aperture SAR is presented in this paper to remove the Doppler ambiguity of fast target after clutter suppression. Dual Frequency Conjugated Processing (DFCP) and Keystone transform are employed to remove the Doppler ambiguity and correct range migration of moving target. Thus the Signal Noise Ratio (SNR) can be improved, and then target detection, velocity estimation and location without ambiguity can be completed. The proposed method can achieve the same location accuracy with the existing method as well as increase greatly the velocity range of fast target that can be detected and located. The simulation results show the effectiveness of proposed method.

Key words: Moving Target Indication (MTI); SAR; Fast target detection; Location

1 引言

星载 SAR-MTI 技术能够从高空实现广域监视, 及时发现有价值的运动目标, 在军事和民用领域有重要的应用价值。因此, 动目标检测与定位功能是新一代星载 SAR 系统性能的重要标志, 目前典型应用系统有加拿大的 Radarsat-2^[1]和德国的 TerraSAR-X^[2]。

现有的 SAR-GMTI(SAR-Ground Moving Target Indication)主要对速度较慢的地面运动目标进行观测, 而速度较快的地面运动目标和空中运动目标也应是星载 SAR 的重要监视对象。快速目标由于具有距离徙动严重, 存在多普勒模糊等特点, 给其检测、测速和定位带来很多困难。目前, 已有学者利用频率资源开展了这类目标的检测研究工作^[3-7], 但这些方法都没有考虑距离徙动对目标检测的影响, 很难检测低信噪比快速运动目标。基于顺轨 3 频 3 孔径星载 SAR, 本文研究了低信噪比快速目标的检测、测速及定位方法, 在杂波对消后用多频信号去除快速目标的多普勒模糊, 并在目标检

2009-04-02 收到, 2009-11-24 改回

国家自然科学基金(60772103)和微波成像技术国家级重点实验室基金(9140C1903050804)资助课题

通信作者: 尹建凤 glidingyin@163.com

测过程中进行距离徙动校正, 在兼顾对慢速目标的检测及定位性能的同时, 解决了快速目标的检测、测速及定位问题。仿真试验验证了本文方法的有效性。

2 3 频 3 孔径星载 SAR 信号模型

未来的星载 SAR 系统将更多地采用有源相控阵天线^[1], 这为多频多孔径体制 SAR 的实现提供了便利条件。本文采用有源相控阵天线形成沿方位向等间隔分布的 3 个相位中心, 等效于沿方位向布置 3 个子孔径。图 1 为 3 频 3 孔径星载 SAR 对运动目标成像的几何关系图。

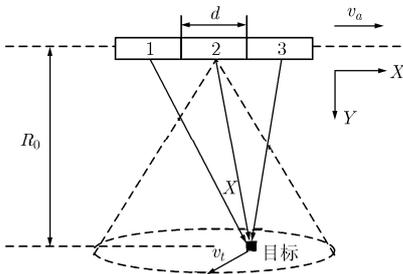


图 1 3 频 3 孔径星载 SAR 成像空间几何关系图

其中序号 1, 2, 3 代表沿方位向排列的 3 个子孔径, 子孔径长度和孔径中心间隔均为 d , 子孔径 2 到场景中心的距离为 R_0 , 雷达沿 X 方向以速度 v_a 运动, 视线方向为 Y 方向, 记录 SAR 运动到与场景中心对应位置的时刻为 $t_m = 0$ 。初始时刻运动目标的位置为 (x_0, y_0) , 其运动速度为 (v_x, v_y) 。每个脉冲内, 子孔径 1、2、3 分别发射载频为 f_1, f_2, f_3 脉宽为 T_p , 调频率为 K_r 的线性调频信号, 每个子孔径都设有 3 个载频不同的接收通道, 因此整个系统共有 9 个接收通道。以 $s_{ij}(\hat{t}, t_m)$ ($i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$) 表示各子孔径收到的回波信号, 其中 i 代表发射子孔径的序号, j 代表接收子孔径的序号。以载频 f_2 为例, 在 $t_m = 0$ 处作泰勒展开, 则可得 $t_m = mT$ (T 为脉冲重复周期) 时刻目标到 3 个子孔径的距离分别为

$$\left. \begin{aligned} R_1(t_m) &= y_0 + v_y \cdot t_m \\ &\quad + \frac{(x_0 + d + t_m \cdot (v_x - v_a))^2 + (v_y \cdot t_m)^2}{2R_c} \\ R_2(t_m) &= y_0 + v_y \cdot t_m \\ &\quad + \frac{(x_0 + t_m \cdot (v_x - v_a))^2 + (v_y \cdot t_m)^2}{2R_c} \\ R_3(t_m) &= y_0 + v_y \cdot t_m \\ &\quad + \frac{(x_0 - d + t_m \cdot (v_x - v_a))^2 + (v_y \cdot t_m)^2}{2R_c} \end{aligned} \right\} (1)$$

忽略收发天线增益的影响, 则距离压缩后 3 个子孔径接收到的信号如式(2)所示, 其中 G_0 为包含目标散射系数和天线增益在内的常数因子, τ_1, τ_2, τ_3 分别为回波信号延迟, $\tau_1 = (R_1(t_m) + R_2(t_m))/c$, $\tau_2 = 2R_2(t_m)/c$, $\tau_3 = (R_2(t_m) + R_3(t_m))/c$, c 为光速, $\lambda_i = c/f_i$ ($i = 1, 2, 3$) 为 3 个发射信号的载波波长。

$$\left. \begin{aligned} s_{21}(\hat{t}, t_m) &= G_0 \cdot \exp(-j2\pi f_2 \tau_1) \cdot \frac{\sin \pi K_r (\hat{t} - \tau_1) T_p}{\pi K_r (\hat{t} - \tau_1) T_p} \\ s_{22}(\hat{t}, t_m) &= G_0 \cdot \exp(-j2\pi f_2 \tau_2) \cdot \frac{\sin \pi K_r (\hat{t} - \tau_2) T_p}{\pi K_r (\hat{t} - \tau_2) T_p} \\ s_{23}(\hat{t}, t_m) &= G_0 \cdot \exp(-j2\pi f_2 \tau_3) \cdot \frac{\sin \pi K_r (\hat{t} - \tau_3) T_p}{\pi K_r (\hat{t} - \tau_3) T_p} \end{aligned} \right\} (2)$$

3 目标检测

为了解决杂波环境下低信噪比高速目标的检测问题, 本文将综合多种频率信息解运动目标的多普勒模糊问题。因解多普勒模糊的方法-双频共轭处理^[8]会使动目标的等效多普勒中心频率大大降低, 所以, 为了更好地保留动目标信息, 解模糊应在杂波对消之后进行。已知相邻子孔径回波信号的时间差为 $\Delta t = d/(2v_a)$, 经过相位补偿和时移, 可依次对各载频的相邻两路信号进行杂波对消处理, 可得两路输出残差信号分别为

$$\left. \begin{aligned} s_{k2}(\hat{t}, t_m) - s_{k1}(\hat{t}, t_m + \Delta t) \cdot C &= G_0 \cdot \exp(-j2\pi f_k \tau_k) \\ &\quad \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda_k} v_y \Delta t\right) \cdot 2j \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} v_y \Delta t\right) \\ s_{k3}(\hat{t}, t_m - \Delta t) \cdot C - s_{k2}(\hat{t}, t_m) &= G_0 \cdot \exp(-j2\pi f_k \tau_k) \\ &\quad \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda_k} v_y \Delta t\right) \cdot 2j \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_k} v_y \Delta t\right) \end{aligned} \right\} (3)$$

其中 $C = \exp\left(-j \frac{\pi d^2}{2R_0 \lambda_2}\right)$ 为相位补偿因子, 下标 $k =$

1, 2, 3, 代表载频序号或时延序号。

现以载频 f_1 和 f_3 杂波对消后的信号为例, 进行双频共轭处理, 得

$$\left. \begin{aligned} s_{31-21} &= s_{1-21}^*(\hat{t}, t_m + 2 \cdot \Delta t) \cdot s_{3-21}(\hat{t}, t_m) \\ &= 2G_0 \cdot \exp[-j2\pi(f_3 - f_1)\tau_3] \\ &\quad \cdot \exp\left[-j2\pi\left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1}\right)v_y \Delta t\right] \cdot \text{sgn}(\beta(v_y)) \sqrt{|\beta(v_y)|} \\ s_{31-32} &= s_{1-32}^*(\hat{t}, t_m + 2 \cdot \Delta t) \cdot s_{3-32}(\hat{t}, t_m) \\ &= 2G_0 \cdot \exp[-j2\pi(f_3 - f_1)\tau_3] \\ &\quad \cdot \exp\left[j2\pi\left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1}\right)v_y \Delta t\right] \cdot \text{sgn}(\beta(v_y)) \sqrt{|\beta(v_y)|} \end{aligned} \right\} (4)$$

其中 $\beta(v_y) = \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} v_y \Delta t\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_3} v_y \Delta t\right)$, 信号 $s_{k-ij}(\hat{t}, t_m)$ 的下标 k 代表载频序号, 下标 i, j 代表参与对消信号的接收子孔径序号。信号 s_{kl-ij} 的下标中, k 和 l 表示进行双频共轭处理的两信号的载频序号即 f_k 和 f_l , i 和 j 的含义与上述相同。继而, 分别对信号 s_{31-21} 和 s_{31-32} 进行 Keystone 变换和距离弯曲校正, 此时合成信号的等效载频为 $f_3 - f_1$ 。然后将两路信号变换到方位频率域, 即可实现动目标检测和干涉相位测速, 此时, 干涉相位的表达式如下

$$\Delta\Phi = \arg\{s_{31-32} \cdot s_{31-21}^*\} = \frac{2\pi v_y d}{v_a} \left(\frac{1}{\lambda_3} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \quad (5)$$

进一步可得所测得的目标径向速度为

$$v_y = \frac{v_a \Delta\Phi \lambda_3 \lambda_1}{2\pi d (\lambda_1 - \lambda_3)} \quad (6)$$

通过式(5)可知, 经过双频共轭处理后合成信号的无模糊测速范围为 $\left[-\frac{v_a \lambda_3 \lambda_1}{2d(\lambda_1 - \lambda_3)}, \frac{v_a \lambda_3 \lambda_1}{2d(\lambda_1 - \lambda_3)}\right]$, 对比单频信号的测速范围, 可知, 经双频共轭处理后, 无模糊测速范围大大增加, 此时的速度测量误差的表达式为

$$\sigma_{v_y} = \frac{\sigma_{\Delta\Phi} \lambda_3 \lambda_1 v_a}{2\pi d (\lambda_1 - \lambda_3)} \quad (7)$$

其中 $\sigma_{\Delta\Phi}$ 为双频共轭处理后, 干涉相位的标准差。

为了简要说明处理流程, 上面选择了载频 f_1 和 f_3 的信号为例进行共轭处理。在实际应用中, 不可能预先知道要检测的目标会在哪个频率上表现为盲速, 所以应将 3 个频率杂波对消后的信号进行两两共轭处理, 再分别将双频共轭后各通道的信号进行距离徙动校正、目标检测和测速, 最后综合 3 个通道的检测结果, 以确保不丢失在某个频率上为盲速的动目标。

4 目标径向速度估计及定位

从式(7)可知, 由于共轭处理后等效波长大大增加, 故测速精度降低, 也就是说虽然共轭处理可解决多普勒模糊的问题, 有助于快速目标检测、能够实现粗测速, 但难以满足通常的定位精度需求。为了解决这一问题, 在等效波长上完成速度估计后, 对那些存在多普勒模糊的目标, 首先用估计的速度对经过杂波对消的信号(如载频 f_2 上)解模糊, 再进行剩余的距离徙动校正, 而后进行目标检测, 将此时 (r, f_d) 域内的两路信号记为 $S'_{2-32}(\hat{t}, f_d)$ 和 $S'_{2-21}(\hat{t}, f_d)$, 则干涉相位为

$$\Delta\Phi' = \arg\{S'_{2-32}(\hat{t}, f_d) \cdot S'_{2-21}(\hat{t}, f_d)^*\} = \frac{2\pi v_y' d}{\lambda_2 v_a} \quad (8)$$

其中 \hat{f}_d 为检测到的目标所在的多普勒单元, * 表示取共轭, 则经补偿后剩余径向速度 v_y' 为

$$v_y' = \frac{\lambda_2 v_a \Delta\Phi'}{2\pi d} \quad (9)$$

理想情况下, 假定只存在热噪声引起的相位误差, 则此时径向速度的测量精度可表示为

$$\sigma_{v_y'} = \frac{\sigma_{\Delta\Phi'} \lambda_2 v_a}{2\pi d} \quad (10)$$

其中 $\sigma_{\Delta\Phi'}$ 为干涉相位的标准差。

由目标多普勒频率与方位真实位置以及径向速度之间的关系, 可得目标的真实方位位置为

$$\hat{x}_0 = \frac{(\lambda_2 \hat{f}_d + 2v_y') R_0}{2v_a} \quad (11)$$

通过式(11)可知, 此时的方位向定位精度为

$$\sigma_{x_0} = \frac{(\lambda \sigma_{f_{dc}} + 2\sigma_{v_y'}) R_0}{2v_a} \quad (12)$$

其中 $\sigma_{f_{dc}} = 1/T_s$ 为多普勒频率分辨率, T_s 为合成孔径时间。

通过式(7)和式(10)的对比可知, 在等效波长上的径向速度测量精度较低, 但只要该精度能够满足进一步测速时解多普勒模糊的需求即可, 而在原载频信号上的测速精度较高, 最终的方位位置定位精度由式(12)决定。另外, 本文的距离徙动校正均是以 $t_m = 0$ 时刻为参考点, 所以, 得到的距离向位置是 $t_m = 0$ 时刻的, 且精度与分辨单元相当。

5 3 频率的选择

系统对盲速范围、无模糊测速和定位范围及测速精度的需求是频率选择的依据。为了解决盲速问题^[9]和确保双频共轭处理的有效应用, 应至少选择 3 个频率。在实际中可先根据系统主要指标, 选定其中一个频率, 而后再根据如下约束确定另外两个频率。

首先, 频率的选择需考虑允许的最大无模糊测速范围, 经分析可知, 若能够实现无模糊测速, 则必然已经解模糊并检测到目标了, 对频率的约束如下

$$|f_i - f_j| \leq \frac{v_a \cdot c}{2v_{y\max} d} \quad (13)$$

其中 $v_{y\max}$ 为需要无模糊测量的最大径向速度, $i = 1, 2, 3$, $j = 1, 2, 3$, 但 $i \neq j$, 也就是说任意两个频率之间都要满足无模糊测速的要求。

其次, 频率的选择还受测速精度的限制, 这里的测速精度是指共轭处理后, 低载频时的测速精度, 主要用来对原载频信号解模糊, 为了确保经这个速度估计值补偿后的原载频信号不存在多普勒模糊, 频率选择需满足

$$|f_i - f_j| \geq \frac{2\sigma_{\Delta\phi} v_a f_i}{\pi d \cdot \text{PRF}} \quad (14)$$

综上所述, 提高测速精度希望不同载频的间隔越大越好, 但解多普勒模糊却要求频率间隔越小越好, 所以, 在实际系统设计时应折中选择。

6 仿真结果与讨论

为了验证本文提出的快速动目标检测和定位方法的有效性, 设置如下的仿真实验, 在整个场景中设置 55 个静止目标、3 个运动目标(尺寸 6 m×6 m, 形状为成“十”字形的 5 个散射点), 具体参数设置见表 1。假定雷达观测范围内, 最快速的目标为 700 m/s。将系统参数代入式(13)和式(14)可知, 频率设置满足这两个约束条件的限制。

表 1 仿真的系统参数和目标参数

SAR 系统参数		地面静止目标参数	
载频 f_1	9.75 GHz	个数	55
载频 f_2	10 GHz	方位间距	1600 m
载频 f_3	10.15 GHz	距离间距	40 m
信号带宽	150 MHz	场景中心斜距	800 km
方位向天线长度	7.5 m	杂噪比(脉压后)	24.8 dB
子孔径长度	2.5 m	运动目标参数	
轨道高度	565.7 km	个数	3
入射角	45°	位置:	场景中心
距离分辨率	1.0 m	目标 1 地距速度:	10 m/s
方位分辨率	1.25 m	SNR:	9.8 dB
脉冲宽度	2 μs	距离向位置:	21 m
PRF	7272 Hz	目标 2 方位向位置:	21 m
合成孔径时间	1.27 s	地距速度:	95 m/s
处理脉冲数	9216	SNR:	5.8 dB
距离场景尺寸	160 m	位置:	场景中心
方位场景尺寸	9600 m	目标 3 地距速度:	200 m/s
天线斜视角	0°	SNR:	5.8 dB

考虑到实际应用中会存在系统误差和测量误差, 引入如下的误差分量, SAR 平台速度测量误差 $\Delta v_a = 0.1 \text{ m/s}$, 角度测量误差 $\Delta\theta = 0.1^\circ$, 基线长度测量误差 $\Delta d = 1 \text{ mm}$, 通道间的幅度相位不一致性 $\Delta A = 0.5 \text{ dB}$, $\Delta\beta = 5^\circ$ 。当输入 SNR 和 CNR 分别为 25 dB 和 35 dB 时, 可给出综合多频信息前后的杂波对消性能曲线^[10], 如图 2-图 3 所示。

图 2 为误差情况下 3 频率信号在短基线(2.5 m)时各自的杂波对消性能曲线, 可见, 单频信号的杂波对消处理存在很多速度凹口, 不利于快速目标检测。图 3 为综合频率和基线信息后, 理想和实际情况下的对消性能曲线, 可见综合 3 频信号后, 第一等效盲速大大扩大。图 4 为理想情况下, 仿真设置的 3 个动目标在 f_2 上的杂波对消性能曲线, 可见目标 1 在杂波对消时的 SCNR 损失最大, 目标 3 最小。

文献[11]的目标检测方法也考虑了距离徙动校正, 能够改善对不存在多普勒模糊的运动目标的检测性能, 但文中未考虑快速目标回波存在多普勒模糊时的检测问题。而要彻底解决杂波环境下快速目标的检测问题, 引入多频多孔径资源是必要的。

图 5 给出了文献[11]的方法对载频 f_2 的相邻两通道回波信号的目标检测结果, 可见该方法能够实现不存在多普勒模糊的目标 1 和目标 2 的有效检测, 目标 3 由于存在多普勒模糊, Keystone 变换无法校正其距离徙动, 因此, 信号能量依然很分散, 图 5(b)和图 5(c)分别为目标 1 和目标 2 中心所在距离单元的方位切面。对目标 1 的测速结果为 -10.02 m/s, 接近于真实值, 定位位置为 $\hat{x}_{01} = 1.5 \text{ m}$ 。由于目标 2 存在测速模糊, 无法准确测量其速度, 测速结果为 -35.2 m/s, 与理论上的模糊速度 -36.8 m/s 接近。可见考虑距离徙动校正的单频 3 通道 SAR 对速度较高的目标检测时, 仍会存在测速模糊问题, 甚至难以实现目标检测。

图 6 为本文方法对式(6)的前路信号进行目标检测的结果。图 6(b)和图 6(c)分别为目标 1, 目标 3

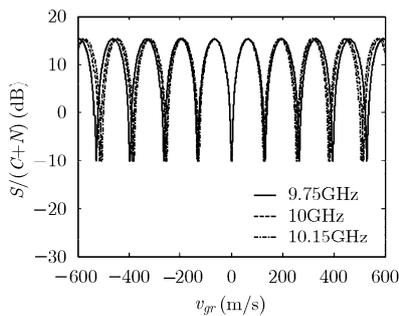


图 2 三频信号各自的杂波对消曲线

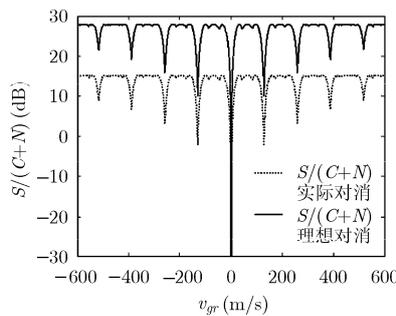


图 3 综合频率和基线后的对消曲线

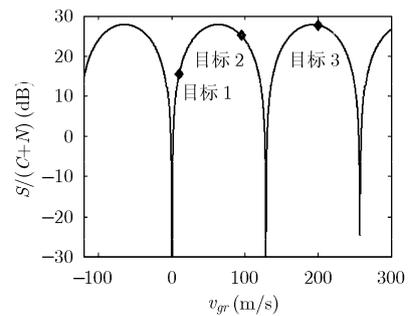


图 4 三个目标在 f_2 上的杂波对消特性

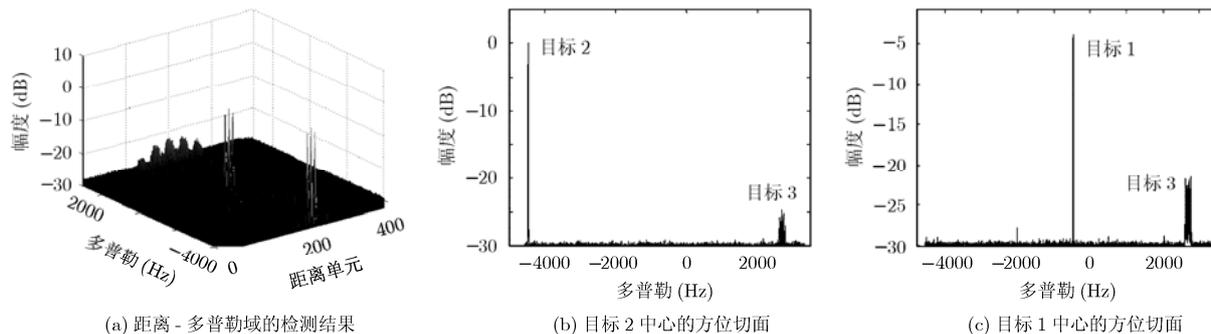


图5 文献[11]方法的目标检测结果

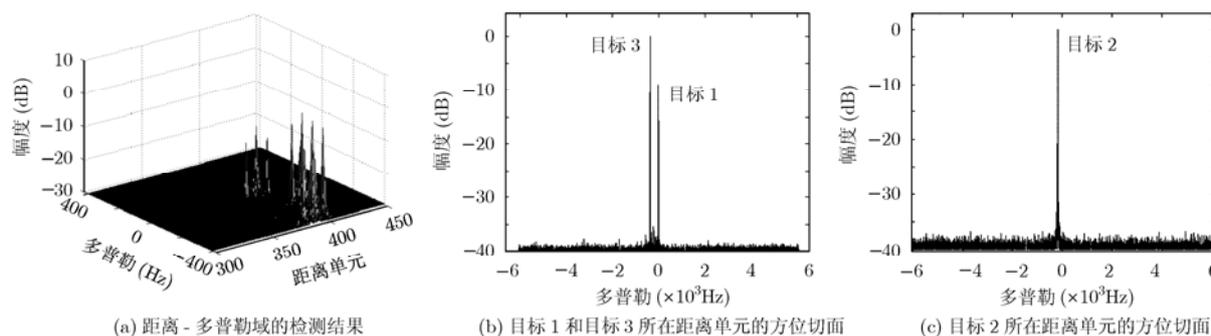


图6 DPCA-DFCP后的目标检测结果

和目标2所在距离单元的方位切面。可见，初始信噪比较低、但在杂波对消中能量损失较少的快速目标3，通过解模糊、距离徙动校正和相干积累，获得了最大的信噪比。对3个目标干涉测速的结果分别为 $\hat{v}'_{gr1} = 11.8 \text{ m/s}$ ， $\hat{v}'_{gr2} = 95.06 \text{ m/s}$ ， $\hat{v}'_{gr3} = 199.8 \text{ m/s}$ 。由于单载频时已能够对目标1无模糊测速，而且单载频时的测速精度高，所以，目标1的测速及定位结果以单载频信号为准。对目标2和目标3，需利用其估计的速度对原载频杂波对消后信号解模糊后，再进行测速和定位处理，最终可得3个目标的位置分别为 $\hat{x}'_{01} = 1.5 \text{ m}$ ， $\hat{x}'_{02} = 18.5 \text{ m}$ ， $\hat{x}'_{03} = 5.9 \text{ m}$ ，与真实值吻合较好。本文中将检测门限设为 15 dB，对检测到的目标经门限选通后，再实施测速和定位，测速结果为对检测到的目标峰值以下 5 dB 内的所有散射点测速后的平均值。

本文仿真设置中，从给定的目标速度可知，综合3个频率信息与综合 f_1 和 f_3 的检测结果差异很小，并且频差大有利于提高测速精度，故这里就以这两个频率综合的检测结果为准。

综上所述，本文方法对那些存在多普勒模糊、距离徙动严重的低信噪比快速目标，也能够实现目标检测并对其定位。图7给出了本文方法的最终定位性能与信杂噪比的关系曲线。由于在检测过程中，对运动目标进行初步的聚焦成像，因此，动目标的信杂噪比一般可达到 30 dB 左右，多视处理后，干涉

相位的测量精度还可进一步提高，定位精度能达到 30 m。

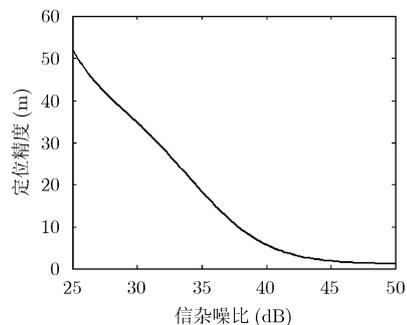


图7 定位性能与信杂噪比的关系曲线

7 结束语

本文研究了顺轨3频3孔径星载SAR的低信噪比快速目标检测及定位问题。与现有的其他方法不同，本文在杂波对消后的目标检测过程中就引入多频信号解多普勒模糊和盲速问题，在此基础上，系统地给出了低信噪比快速目标检测、无模糊测速和定位的信号处理方案，使得那些原本距离徙动严重、存在多普勒模糊的快速目标能够被检测到，并最终对其定位。本文方法在获得与现有其他方法相当的定位精度的同时，扩大了可检测和定位的目标速度范围。理论分析和仿真结果都证明了本文方法在低信噪比快速目标检测及定位上的优越性。

参 考 文 献

- [1] Nohara T J, Weber P, and Premji A, *et al.* SAR-GMTI processing with Canada's Radarsat 2 satellite[C]. Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium, Alberta, Canada, 2000: 379-384.
- [2] Suchandt S, Runge H, and Breit H. Traffic measurement with TerraSAR-X: Processing system overview and first results[C]. The 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany: 2008: 55-58.
- [3] Li Gang, Xu Jia, and Peng Ying-ning, *et al.* Bistatic linear antenna array SAR for moving target detection, location, and imaging with two passive airborne radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 554-565.
- [4] Ruegg M, Meier E, and Nuesch D. Capabilities of dual-frequency millimeter wave SAR with monopulse processing for ground moving target indication[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 539-553.
- [5] Ender J H G and Brenner A R. Demonstration of advanced reconnaissance techniques with the airborne SAR/GMTI sensor PAMIR[J]. *IEE Proceedings-Radar Sonar Navigation*, 2006, 153(2): 152-162.
- [6] Wang G Y, Xia X G, and Chen V C, *et al.* Detection, location, and imaging of fast moving targets using multifrequency antenna array SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, 40(1): 345-355.
- [7] Xu Jia, Li Gang, and Peng Ying-ning, *et al.* Parametric velocity synthetic aperture radar: multi-look processing and its application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3488-3502.
- [8] 尹建凤, 李道京, 汤立波, 吴一戎. 星载 SAR 的空中运动目标检测和成像[J]. *电子学报*, 2007, 36(6): 1032-1036.
- Yin Jian-feng, Li Dao-jing, and Tang Li-bo, *et al.* Spaceborne SAR detecting and imaging of airborne moving targets [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(6): 1032-1036.
- [9] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理, 第三版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 267-271.
- Ding Lu-fei and Geng Fu-lu. Radar Principle, The 3rd Edition. Xi'an: Xidian University Press, 2002: 267-271.
- [10] Yadin E. A performance evaluation model for a two port interferometer SAR-MTI[C]. IEEE National Radar Conference, Southeastern Michigan, USA, 1996: 261-266.
- [11] 李道京, 汤立波, 吴一戎, 丁赤飏. 顺轨双天线机载 InSAR 的地面运动目标检测研究[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(10): 961-964.
- Li Dao-jing, Tang Li-bo, and Wu Yi-rong, *et al.* Ground moving target indication based on along track airborne InSAR with two antennas[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(10): 961-964.

尹建凤: 女, 1981年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达的运动目标检测与成像处理。

李道京: 男, 1964年生, 研究员, 研究方向为雷达系统和雷达信号处理。

吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要研究方向为信号与信息处理。