

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

田 斌 朱岱寅 朱兆达

(南京航空航天大学信息科学与技术学院 南京 210016)

摘要: 该文针对机载双通道 SAR-GMTI 系统及实测数据, 提出一种新的地面慢动目标检测方法。该方法基于双通道样本协方差矩阵特征值分解, 将杂波第 2 特征值和干涉相位联合统计特性的研究结果用于慢动目标检测, 即根据给定的恒虚警概率确定一条联合分布的第 2 特征值—干涉相位等高线作为门限检测曲线, 同时结合第 2 特征值、干涉相位门限预处理, 实现地面慢动目标的精确检测。实测数据实验结果表明: 该方法不但扩大了慢动目标的可检测速度范围, 同时还降低了系统的虚警概率。

关键词: 动目标检测; 样本协方差矩阵; 特征值分解; 联合概率分布; 等高线

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2636-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01570

Dual Channels SAR Ground Moving Target Detection with Eigen-decomposition of the Sample Covariance Matrix

Tian Bin Zhu Dai-yin Zhu Zhao-da

(College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A novel approach to moving target detection is proposed for dual-channel SAR system. This approach is on the basis of eigen-decomposition of the sample covariance matrix and examines the statistic of the second eigenvalue and the Along-Track Interferometric (ATI) phase for ground moving target indication. Based on this statistic, a new Constant False Alarm Rate (CFAR) detector can be designed to solve the problem of GMTI. To detect slow moving targets more accurately, the second eigenvalue and the ATI phase pre-thresholds are implemented before a CFAR detector. Experimental results on measured SAR data are presented to demonstrate that this novel detector has wider range of detection velocity and lower false alarm probability.

Key words: Moving target detection; Sample covariance matrix; Eigen-decomposition; Joint probability distribution; Contour line

1 引言

以合成孔径雷达(SAR)技术为基础, 解决机载雷达对地面动目标的检测(GMTI), 是目前雷达信号处理领域的一个重要研究方向, 也是当前 SAR 领域的一个研究热点。目前常用的双通道 SAR/GMTI 数据处理技术包括: 方位向干涉技术(Along-Track Interferometry, ATI)和相位中心偏置技术(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)^[1-4]。ATI 技术能检测到杂波谱内的慢速运动目标, 但受信杂比的影响较大, 信杂比越小, 难以有效提取出动目标信息。而 DPCA 技术虽然简单准确, 但使用该方法时载机速度、脉冲重复频率和相位中心间距

之间必须满足严格的条件, 使其在实际应用中受到了一定的限制。

2003 年, Sikaneta, Gierull 等人^[5]通过对双通道样本协方差矩阵特征值分解, 提出利用特征分解得到的第 2 特征值、干涉相位、相似度 3 个参量来实现 SAR 图像上的动目标的检测。由于上述 3 个动目标检测量只是利用了幅度和相位信息的单个方面, 其检测结果并不理想。为此, Sikaneta 等人^[6]在以后的研究中又提出了两种联合检测方法——归一化相位检测和双曲线检测。前者结合了相似度和干涉相位信息, 与干涉相位检测相比, 仅提高了目标相位落入 $[\pi/2, \pi]$ 区间时的检测性能; 后者同时利用了第 2 特征值、干涉相位和相似度信息, 目标检测性能得到一定的提高, 但检验统计量表达式中第 2 特征值阶数的选取有待进一步研究。

针对现有方法中存在的缺点, 本文提出一种新

2009-12-08 收到, 2010-04-21 改回

航空科学基金(20080152004)和教育部高校博士点基金

(20070280531)资助课题

通信作者: 田斌 tianbin218@163.com

的基于第 2 特征值和干涉相位联合的动目标检测方法。该方法将杂波第 2 特征值和干涉相位联合统计特性的研究成果用于慢动目标的检测, 即根据给定的恒虚警概率确定一条联合分布的第 2 特征值—干涉相位等高线作为门限检测曲线, 来去除场景中的杂波; 在此基础上, 结合第 2 特征值、干涉相位门限预处理去除由强点状杂波、相位漂移和噪声影响产生的干扰信号, 从而提高对慢动目标的检测性能。实验结果证明了该方法的有效性。

2 双通道 SAR 样本协方差矩阵特征值分解

假设两幅 SAR 复图像已经通道误差校正和位置配准, 复图像 1 中各像素表示为 $Z_1(x, y)$, 复图像 2 中的对应像素为 $Z_2(x, y)$, 构造向量 $\mathbf{Z} = [Z_1(x, y), Z_2(x, y)]^T$, 则该像素对应的样本协方差矩阵为(有效视数为 n)

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{Z}_i \mathbf{Z}_i^H = \begin{bmatrix} \delta_1^2 & \delta_1 \delta_2 \gamma_s e^{j\Delta} \\ \delta_1 \delta_2 \gamma_s e^{-j\Delta} & \delta_2^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 δ_1^2 , δ_2^2 表示两通道信号的方差, $\gamma_s e^{j\Delta}$ 表示通道之间的复相关系数, 复相关系数的幅度 γ_s 称为相关度。

对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行对角化, 有

$$\hat{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \hat{R}_{11} & \hat{R}_{12} \\ \hat{R}_{21} & \hat{R}_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{U} \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 \end{bmatrix} \mathbf{U}^H \quad (2)$$

由于 $\hat{\mathbf{R}}$ 是 Hermite 矩阵, 所以其特征值 Λ_1 , Λ_2 全为实数。 \mathbf{U} 为特征向量构成的随机矩阵, \mathbf{U} 可表示为^[5]

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & e^{j\Delta} \sin \Theta \\ e^{-j\Delta} \sin \Theta & -\cos \Theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(2)展开可得到分解前后各变量之间的对应关系:

$$\Delta = \arg(\hat{R}_{12}) \quad (4)$$

$$\Theta = \begin{cases} \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2|\hat{R}_{12}|}{\hat{R}_{11} - \hat{R}_{22}} \right), & \hat{R}_{11} \geq \hat{R}_{22} \\ \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2|\hat{R}_{12}|}{\hat{R}_{11} - \hat{R}_{22}} \right) + \frac{\pi}{2}, & \hat{R}_{11} < \hat{R}_{22} \end{cases} \quad (5)$$

$$\Lambda_1 = \frac{1}{2} \left[\hat{R}_{11} + \hat{R}_{22} + \sqrt{4|\hat{R}_{12}|^2 + (\hat{R}_{11} - \hat{R}_{22})^2} \right] \quad (6)$$

$$\Lambda_2 = \frac{1}{2} \left[\hat{R}_{11} + \hat{R}_{22} - \sqrt{4|\hat{R}_{12}|^2 + (\hat{R}_{11} - \hat{R}_{22})^2} \right] \quad (7)$$

其中 $0 < \Lambda_2 \leq \Lambda_1$, $\Delta \in [-\pi, \pi)$, $\Theta \in [0, \pi/2)$ 。

从文献[5]的分析可知, 第 2 特征值 Λ_2 , 干涉相位 Δ , 以及相似度 Θ 都可作为检测动目标的判断依

据, 但从检测结果来看效果均不理想。本文提出一种新的动目标检测算法。该算法的本质是对第 2 特征值和干涉相位的有效组合, 它融合了第 2 特征值和干涉相位两种检测方法中的有利因素, 提高了系统对动目标的检测性能。

3 第 2 特征值-干涉相位的联合检测

3.1 第 2 特征值和干涉相位的联合分布

若雷达通道建模为零均值的高斯过程, 则由文献[5]可知特征值变量 Λ_1 , Λ_2 和变量 Δ , Θ 的联合概率密度函数为

$$f_{\Lambda_1, \Lambda_2, \Delta, \Theta}(\lambda_1, \lambda_2, \varphi, \theta) = \frac{\sin 2\theta (\lambda_1 \lambda_2)^{n-2} (\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2\pi \Gamma(n) \Gamma(n-1) \det(\mathbf{R})^n} e^{-\text{Tr} \left\{ -\mathbf{U}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{U} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \right\}} \quad (8)$$

其中 \mathbf{R} 为杂波协方差矩阵, $\Gamma(n)$ 是 gamma 函数, $\det(\cdot)$ 表示行列式运算符, $\text{Tr}(\cdot)$ 表示迹运算符。对 Λ_1 和 Θ 进行积分, 求得第 2 特征值 Λ_2 和干涉相位 Δ 的边缘概率密度函数为^[5]

$$f_{\Lambda_2, \Delta}(\lambda_2, \varphi) = \frac{\lambda_2^{n-2}}{2\pi \Gamma(n) \Gamma(n-1) (s_1 s_2)^n} \int_0^{\pi/2} \sin(2\theta) \exp^{-B\lambda_2} \cdot \left[\frac{\Gamma(n+1, A\lambda_2)}{A^{n+1}} - \frac{2\lambda_2 \Gamma(n, A\lambda_2)}{A^n} + \frac{\lambda_2^2 \Gamma(n-1, A\lambda_2)}{A^{n-1}} \right] d\theta \quad (9)$$

其中 $A = \frac{(s_1 + s_2) - (s_1 - s_2) \cos \varphi \sin(2\theta)}{2s_1 s_2}$, $B = \frac{(s_1 + s_2) + (s_1 - s_2) \cos \varphi \sin(2\theta)}{2s_1 s_2}$, s_1 和 s_2 是杂波协方

差矩阵 \mathbf{R} 的两个特征值, 且 $s_1 = \delta^2(1 + \gamma)$, $s_2 = \delta^2(1 - \gamma)$, δ^2 为通道信号的方差, γ 为杂波的相关度。图 1 给出了当 $n=2$ 时的第 2 特征值和干涉相位联合概率分布的等高线图。

3.2 第 2 特征值-干涉相位的联合检测

图 2 显示了 SAR 成像系统无噪声情况下杂波和动目标的“第 2 特征值-干涉相位”分布情况。图

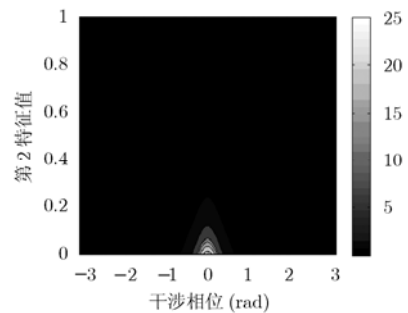


图 1 第 2 特征值和干涉相位联合概率分布的等高线图($\delta^2 = 1$, $\gamma = 0.9213$)

中, 杂波主要分布在坐标零点周围, 具体表现为第 2 特征值较大的像素点干涉相位小, 第 2 特征值较小的像素点干涉相位大; 对于慢动目标而言, 由于径向速度的存在使对应的像素点具有较大的干涉相位。同时慢动目标的存在使得通道之间不完全匹配, 从而引起该像素点对应的第 2 特征值增大, 因而慢动目标的像素点在第 2 特征值-干涉相位分布图中表现为“奇异离散点”。可设置适当的第 2 特征值门限或干涉相位门限来实现慢动目标检测, 第 2 特征值门限 Λ_{th} 和干涉相位门限 Δ_{th} 由下式决定^[1,6]:

$$\int_{\Lambda_{th}}^{+\infty} f_{\Lambda_2}(\xi|n, s_1, s_2) d\xi = \phi_{\Lambda_2} \quad (10)$$

$$2 \int_{\Delta_{th}}^{\pi} f_{\Delta}(\zeta|n, \gamma) d\zeta = \phi_{\Delta} \quad (11)$$

其中 f_{Λ_2} , f_{Δ} 分别为杂波第 2 特征值和干涉相位的概率密度函数, ϕ_{Λ_2} , ϕ_{Δ} 为目标虚警概率。

实际 SAR 成像系统往往存在加性噪声和随机相位噪声, 这些噪声将直接影响系统对慢动目标的检测性能。图 3 给出了存在噪声时杂波和动目标的“第 2 特征值-干涉相位”分布情况。由图可见, 噪声的存在使图上杂波像素点的第 2 特征值幅值增大, 同时也使干涉相位的标准差增大, 这时如果继续沿用常规的第 2 特征值或干涉相位方法很难实现慢动目标检测, 需要用性能更优的检测算法来实现目标检测。由第 2 节中协方差矩阵的特征分解可知, 第 2 特征值是利用协方差矩阵元素的幅值信息实现目标检测; 而干涉相位则是利用副对角线元素的相位信息实现目标检测。因此, 两个检测量之间具有较强的互补性。为了充分利用协方差矩阵元素的幅度和相位信息, 本文将杂波第 2 特征值和干涉相位联合统计特性的研究结果用于慢动目标检测。图 4 是在图 3 的基础上给出了一组联合分布的第 2 特征值-干涉相位等高线, 其高程值由外向里依次递增, 高程值越大表示杂波像素点落在该等高线附近的概率越大。观察可知, 可以找到一条合适的第 2 特征

值-干涉相位等高曲线将绝大部分杂波和噪声像素点包含在里面。如果把此条曲线作为门限检测曲线, 可有效地去除杂波和噪声。

图 4 上的等高线可通过以下方式进行求解: 令 $\xi_{\Lambda_2}, \zeta_{\Delta}$ 分别为杂波第 2 特征值和干涉相位, $T_{\Lambda_2, \Delta}$ 为门限检测曲线所对应的第 2 特征值-干涉相位等高线高程值, 则在给定目标虚警概率的条件下, $T_{\Lambda_2, \Delta}$ 可由下式确定:

$$P\{f_{\Lambda_2, \Delta}(\xi_{\Lambda_2}, \zeta_{\Delta}) < T_{\Lambda_2, \Delta}\} = \phi_{\Lambda_2, \Delta} \quad (12)$$

其中 P 表示概率值, $\phi_{\Lambda_2, \Delta}$ 表示虚警值, $f_{\Lambda_2, \Delta}$ 表示杂波第 2 特征值和干涉相位的联合概率密度函数。在求解得到门限值 $T_{\Lambda_2, \Delta}$ 后, 就可以对每一个像素点 P (第 2 特征值 Λ_P , 干涉相位 Δ_P) 进行检测。具体实现时: 首先, 把像素点 P 的 Λ_P 和 Δ_P 代入式(9), 计算得到像素点 P 对应的似然函数值 $f_{\Lambda_2, \Delta}(\Lambda_P, \Delta_P)$; 然后将 $f_{\Lambda_2, \Delta}(\Lambda_P, \Delta_P)$ 与 $T_{\Lambda_2, \Delta}$ 进行比较, 若 $f_{\Lambda_2, \Delta}(\Lambda_P, \Delta_P) \geq T_{\Lambda_2, \Delta}$, 则判定像素点 P 是杂波像素, 否则为动目标像素, 以此对像素点进行遍历则可实现动目标检测。

另外, 从图 4 中不难发现, 上述门限检测曲线外的点并非全都是动目标的像素点, 其中还包含了许多虚警点。这些虚警点按其第 2 特征值和干涉相位的大小可划分成两类: 第 1 类, 第 2 特征值小、干涉相位大的虚警点。这主要是受相位漂移^[7]和噪声影响产生的杂波点, 相对于慢动目标, 其第 2 特征值幅度都较小; 第 2 类, 干涉相位小、第 2 特征值大的虚警点。这些点主要是由杂波背景中的强点状杂波产生的, 与慢动目标相比, 其干涉相位较小, 表现在第 2 特征值-干涉相位分布图上, 零干涉相位附近有许多第 2 特征值较大的离散点。以上两类虚警点可通过设置适当的第 2 特征值门限和干涉相位门限将其去除, 两门限取值见第 3.3.1 小节。图 5 显示了包络检测曲线、第 2 特征值门限和干涉相位门限。

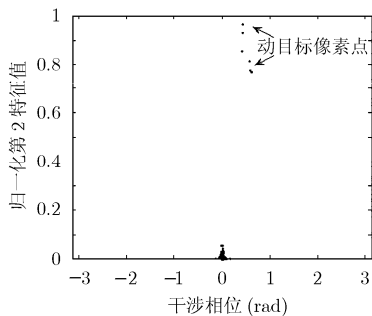


图 2 杂波和动目标的第 2 特征值-干涉相位分布图(动目标的信杂比分别为 7.6 dB, 9.5 dB)

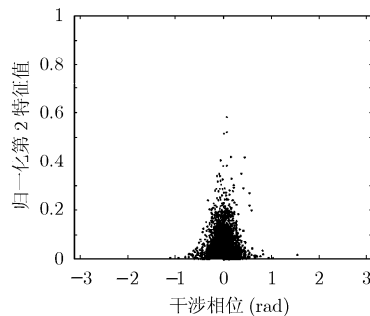


图 3 噪声、杂波和动目标的第 2 特征值-干涉相位分布图(杂噪比为 12.1 dB)

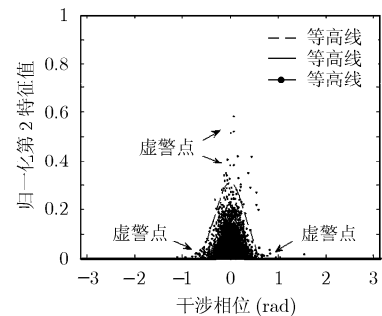


图 4 直方图等高线叠加在第 2 特征值-干涉相位分布图上

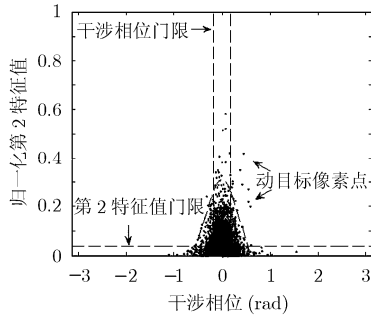


图 5 包络检测门限、第 2 特征值门限、干涉相位门限及第 2 特征值-干涉相位分布图

3.3 参数求解及检测流程

3.3.1 参数求解 (1)样本协方差矩阵的求解: 以被检测像素为中心, 分别截取前向通道图像和后向通道图像的一小块数据估计样本协方差矩阵, 假设数据块大小为 $M \times N$ (M, N 分别代表方位和距离的像素点数, 设 M, N 是奇数), 样本协方差矩阵的估计值可写为

$$\hat{\mathbf{R}}(x, y) = \frac{1}{M \times N} \cdot \sum_{i=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{j=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} \mathbf{Z}(x+i, y+j) \mathbf{Z}(x+i, y+j)^H \quad (13)$$

其中 $\mathbf{Z}(x, y) = [Z_1(x, y), Z_2(x, y)]^T$, x 和 y 分别表示中心像素点的方位向位置和距离位置。

(2)杂波协方差矩阵的求解: 如果将 SAR 图像作为一个整体来处理时, 可认为不包含有任何有价值的动目标信息, 所以杂波协方差矩阵的求解一般是通过求均值来完成的^[1,8]。实际处理中, 为了确保杂波协方差矩阵估计的准确性, 可预先设置第 2 特征值门限去除杂波背景中少数的奇异点, 由去除剩余的所有像素点进行杂波协方差矩阵估计, 其估计值可写为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(Z_1 \cdot Z_1^*) & E(Z_1 \cdot Z_2^*) \\ E(Z_2 \cdot Z_1^*) & E(Z_2 \cdot Z_2^*) \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中 Z_1, Z_2 分别表示前向通道、后向通道复图像。对其进行特征值分解, 得到

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{1}{2} \left[R_{11} + R_{22} + \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2} \right] \\ s_2 &= \frac{1}{2} \left[R_{11} + R_{22} - \sqrt{4|R_{12}|^2 + (R_{11} - R_{22})^2} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

(3)计算多视数^[1]: 用 Δx 表示 SAR 图像方位分辨率, δx 表示方位像素分辨率, 在滑窗长度 L 已知的情况下, 多视数可表示为

$$n = \frac{L \cdot \delta x}{\Delta x} + 1 \quad (16)$$

(4)第 2 特征值、干涉相位预处理门限 $T_{\lambda_2}, T_{\Delta}$ 的求解: 在得到每个像素点对应的第 2 特征值、干涉相位值后, T_{λ_2} 和 T_{Δ} 可通过式(17)算得

$$\left. \begin{aligned} T_{\lambda_2} &= k_1 \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_2(i) \\ T_{\Delta} &= k_2 \delta_{\Delta} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

其中 $\lambda_2(i)$ 为每个像素点对应的第 2 特征值, N 为像素点的总个数, δ_{Δ} 为所有像素点干涉相位的统计标准差。 k_1, k_2 是两个可调常数, 其经验取值分别为 1~2.5, 1~1.5, k_1 过大会造成信杂比较小的慢动目标的漏检, 而过大的 k_2 则会造成最小可检测速度的增大。

3.3.2 检测流程 图 6 给出了本文所提的动目标检测算法的基本流程, 其实现过程可概括为:

第 1 步 以被检像素为中心, 分别截取前向通道图像和后向通道图像的一小块数据估计样本协方差矩阵, 然后利用式(4)和式(7)求得对应这一像素的第 2 特征值和干涉相位。遍历整幅 SAR 图像, 得到每个像素对应的第 2 特征值和干涉相位;

第 2 步 利用式(14), 式(15)和式(16)分别求解得到杂波协方差矩阵的特征值 s_1, s_2 和多视数 n , 然后把 s_1, s_2 和 n 代入式(9)中, 得到第 2 特征值和干涉相位的联合概率密度函数;

第 3 步 根据给定的恒虚警概率, 利用式(12)确定一条联合分布的第 2 特征值-干涉相位等高线作为门限检测曲线;

第 4 步 在第 1 步的基础上, 利用式(17)分别求解得到第 2 特征值和干涉相位预处理门限。然后利用第 2 特征值门限去除由相位漂移和噪声影响产生的杂波点, 接着利用干涉相位门限去除由强点状杂波产生的奇异点;

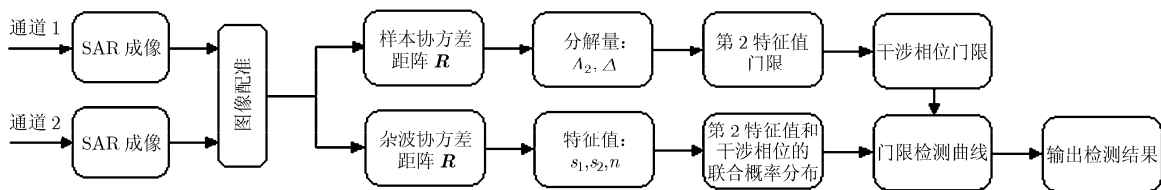


图 6 基于第 2 特征值和干涉相位联合的双通道 SAR 动目标检测算法流程

第5步 利用式(9)计算得到所有剩余像素点对应的似然函数值, 然后将其逐一与第3步求得的包络门限进行比较, 给出最终的检测结果。

4 实测数据处理

为了验证算法的有效性, 本文对某型机载双通道沿航迹干涉 SAR 的试飞数据进行了处理。试验中, 雷达工作在 X 波段, 飞机高度为 5300 m, 飞行速度为 110 m/s, 天线相位中心到成像区中心的距离为 22464 m, 发射 LMF 信号带宽 180 MHz, 脉冲重复频率 1250 Hz, 孔径之间距离 0.7 m。地面场景中, 5 个地面配合目标行驶在一段车辆相对较少且笔直的乡间小道上, 其中有两辆车的方向与另外 3 辆的方向相反, 5 辆车的车速控制在 1~7 m/s。图 7 给出了经过通道误差校正、像素位置配准后的双通道 SAR 图像, 从图中可以看出, 两个接收通道对地面同一场景的 SAR 图像基本一致。

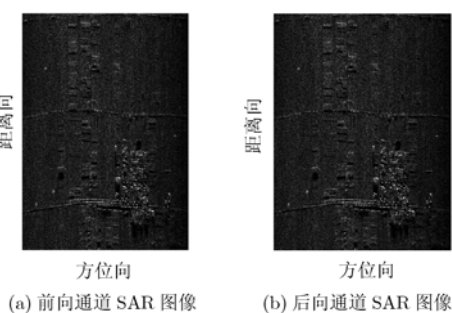


图7 双通道 SAR 图像

有了上述配准后的两幅 SAR 图像, 便可按照上节所述流程进行 CFAR 检测。其中, 虚警概率设为 10^{-4} , 所选窗口的大小为 7×7 , 预处理门限参数 k_1 , k_2 分别为 1.5, 1.5, 动目标 CFAR 检测结果如图 8(a) 所示。在这块数据中我们总共检测到 9 个目标点, 经过确认后, 其中 1、2、3、4、5 为 5 个地面配合车辆, 6 为试验时出现在场景内的其它过往车辆, 其它 3 个目标点为虚警点。图 8(b) 给出了预处理门限参数 k_1 , k_2 分别为 1, 1 时的检测结果, 对比图 8(a) 和图 8(b) 可以发现: 检测器性能受第 2 特征值、干涉相位预处理门限参数变化的影响较小。与此同时, 我们还给出了未经过第 2 特征值、干涉相位门限预处理的检测结果, 如图 8(c) 所示, 其检测结果与图 8(b) 基本相同。

为了进行对比分析, 本文同样采用了文献[6]提出的几种基于样本协方差矩阵特征值分解的动目标检测方法对数据进行了处理, 设第 2 特征值、干涉相位、归一化相位、双曲线检测(检验统计量表达式

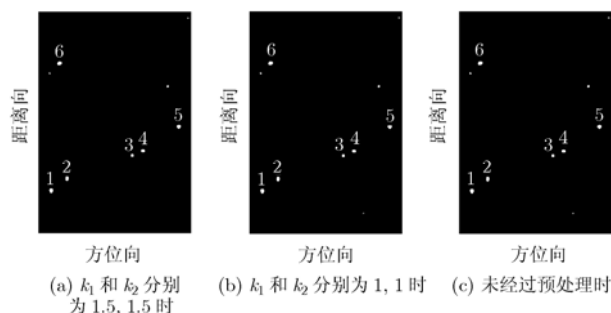


图8 采用本文方法的 CFAR 检测结果

中第 2 特征值的阶数 $p=1$) 的虚警概率都为 10^{-4} , 检测结果如图 9(a), 9(b), 9(c), 9(d) 所示。从检测结果中容易发现: (1) 第 2 特征值检测虽然能把所有的目标都能检测出来, 但虚警点过多, 导致相应的检测性能下降。(2) 归一化相位是通过对于干涉相位和相似度进行函数变换得到的动目标检验统计量, 由于检验统计量中的相似度信息对动目标存在敏感度不高, 因而其检测结果和 ATI 干涉相位方法的检测结果基本上相同。从图 9(b) 和图 9(c) 可看到, 两种方法都对动目标 3 产生漏检, 同时还存在一定数量虚警点。产生漏检的主要原因是目标运动速度较小。(3) 双曲线检测方法是基于第 2 特征值和归一化相位的联合信息进行检测, 从图 9(d) 检测结果来看, 该方法与本文方法的目标检测性能相当。由文献[6]分析可知, 双曲线检验统计量中第 2 特征值阶数 p 的取值与实际检测环境有关, 如何对其进行取值有待进一步研究, 而 Sikaneta 在文献中仅对 $p=1$ 的情况进行了研究。实测数据实验结果表明: 当 p 的取值在 0.7 到 1.3 之间时, CFAR 检测结果基本保持不变; 当 p 的取值小于 0.7 或大于 1.3 时, 检测结果图上虚警点的个数明显增加; 当 p 的取值小于等于 0.3 时, 甚至出现了漏警现象。图 9(e) 和 9(f) 分别给出了 $p=0.3, 1.5$ 时的双曲线方法的检测结果。我们将以上几种方法的检测结果列于表 1。从表 1 中可看出, 与第 2 特征值、干涉相位和归一化相位检测方法相比, 本文所提检测方法具有稳健性强、可检测速度范围大和虚警率低等特点; 与双曲线检测方法相比, 该检测方法不受第 2 特征值阶数的影响、具有较高的实用性。

5 结论

本文提出了一种基于第 2 特征值和干涉相位联合的双通道 SAR-GMTI 方法。该方法将杂波第 2 特征值和干涉相位联合统计特性的研究结果用于慢动目标检测, 即根据给定的恒虚警概率确定一条联合分布的第 2 特征值-干涉相位等高线作为门限检测

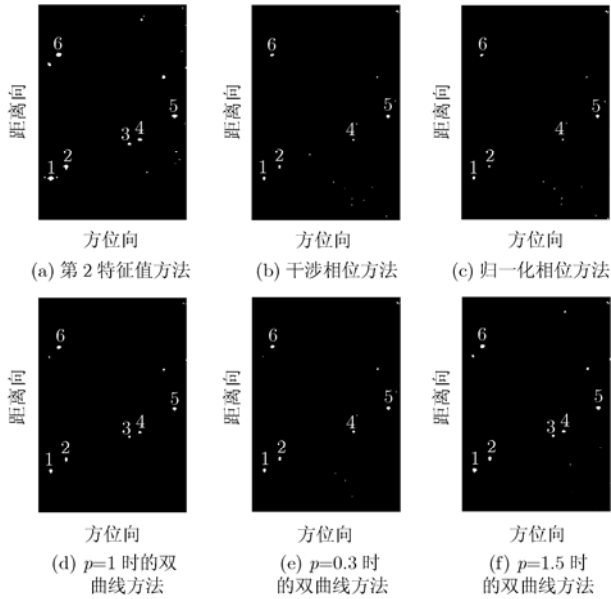


图 9 SAR 图像的动目标检测的结果

表 1 动目标 CFAR 检测结果

采用方法	检测目标数	虚警目标数	漏检目标数
第 2 特征值方法	6	15	0
干涉相位方法	5	12	1
归一化相位方法	5	11	1
$p=0.3$ 时的双曲线检测方法	5	8	1
$p=1.5$ 时的双曲线检测方法	6	7	0
$p=1$ 时的双曲线检测方法	6	4	0
本文检测方法	6	3	0

曲线,同时结合第 2 特征值和干涉相位门限预处理,实现慢动目标的精确检测。实测数据实验结果证明了该方法的有效性和优越性。

参 考 文 献

[1] Gierull C H. Statistics of SAR interferograms with application to moving target detection [R]. Technical Report

TR 2001-045, Defence Research and Development, Canada, 2001.

[2] Budillon A, Pascazio V, and Schirinzi G. Moving target detection in along track SAR interferometry from in-phase and quadrature components data. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008: 1178-1181.

[3] Chapin E and Chen C W. Airborne along-track interferometry for GMTI [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 24(5): 13-18.

[4] Lightstone L, Faubert D, and Rempel G. Multiple phase center DPCA for airborne radar. Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, Los Angeles, USA, 1991: 36-40.

[5] Sikaneta I C, Gierull C H, and Houinard J Y. Metrics for SAR-GMTI based on eigen-decomposition of the sample covariance matrix. IEEE National Radar Conference, Adelaide, Australia, 2003: 442-477.

[6] Sikaneta I C and Houinard J Y. Eigen-decomposition of the multi-channel covariance matrix with applications to SAR-GMTI [J]. *IET Signal Processing*, 2004, 84(9): 1501-1535.

[7] 袁昊, 周荫清, 李景文. 基于幅度和相位联合的 ATI 动目标检测新方法. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 169-175.

Yuan Hao, Zhou Yin-qing, and Li Jing-wen. New method of ATI moving targets indication based on amplitude and phase thresholds [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(2): 169-175.

[8] 时公涛, 匡纲要, 桂琳. 基于邻域平均和正交分解的双通道 SAR 图像域慢动目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(2): 353-357.

Shi Gong-tao, Kuang Gang-yao, and Gui Lin. A novel ground moving target detector in dual-channel SAR images based on adjacent average and orthogonal projection [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(2): 353-357.

田 斌: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为地面慢动目标检测.

朱岱寅: 男, 1974 年生, 教授, 研究方向为雷达成像与信号处理.

朱兆达: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号检测与处理.