

基于干涉图的双通道合成孔径雷达 地面慢动目标检测新方法^{*}

时公涛^{**} 高贵 蒋咏梅 匡纲要 陆军

国防科技大学电子科学与工程学院遥感信息处理实验室, 长沙 410073

摘要 慢动目标检测是利用合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)实现空间对地观测应用的一个主要方面,具有重要的战略意义.为了构建检测率高、实用性强的自动双通道SAR地面慢动目标检测过程,基于ATI(along track interferometry)干涉图幅度和相位的联合统计特性,提出了一种新的检测方法.在理论层面上,推导了均匀区域、一般不均匀区域、极度不均匀区域等不同杂波环境下ATI干涉图幅度和相位的联合分布,给出了相关度参数的无偏估计方法.在算法层面上,以全局ATI幅度自动筛选为基础,通过杂波ATI幅度-相位图零相顶点的确定获得包络检测曲线,进而结合ATI幅度、相位预滤波处理,实现慢动目标的精确检测.此外,在检测的过程中,理论上分析了相位漂移、相干斑起伏噪声、接收机热噪声等对检测性能的影响.仿真实验表明:所提检测方法具有稳健性强、适用范围广、可检测速度范围大、检测率高、虚警率低等特点,说明此方法有较高的实用价值.

关键词 合成孔径雷达 沿迹干涉 慢动目标检测 幅度和相位联合分布

SAR图像域地面慢动目标检测是当前SAR应用的前沿课题,具有重要的理论意义和迫切的实际需求.目前为止,已经提出了很多的图像域慢动目标检测算法,比较著名的包括:单通道的反射率频移(RDM)法^[1],图像分割法^[2],子孔径划分法^[3]和双通道的天线相位中心偏置(DPCA)技术^[4],沿迹干涉(ATI)技术^[4]等.相对于其他方法,ATI技术具有更大的慢动目标检测潜能,被越来越多的机载和星载SAR系统所采用,如美国的JSTARS^[5]机载系统,Discoverer-2^[6]和TechSat21^[7]星载系统,加拿大的CV 580 SAR^[8]机载系统,Radarsat-2^[9]星载系统等.

稳健、实用的ATI技术的开发一直是人们致力于解决的一个问题.经典ATI技术仅仅利用不同通道之间的相位差(即ATI干涉图相位)进行动目标检测,但由于相位漂移、噪声的影响等造成了相位检

测门限的确定成为一个技术瓶颈,需要专门处理.为此,Chiu提出了一种经验拟合的方式求解相位门限检测函数^[10],而此方法处理过程较为复杂且对ATI幅值较小的像素的拟合较差.事实上,作为相位信息的一个有利补充,ATI幅度信息的利用也为研究者们广泛关注.可以说,利用幅度信息和相位信息联合应用实现慢动目标的检测是目前ATI技术发展的趋势.较有代表性的如:Gierull利用ATI幅度分布和ATI相位分布实现地面动目标的CFAR(恒虚警率)检测方法^[11],该自动算法为RADAR-SAT-2的GMTI系统所采用,但它的动目标的可检测速度范围受到了较大限制;文献^[12]则提出一种“类Gauss拟合”的方法,此方法虽简单高效但其拟合参数估计问题有待进一步解决.

立足于慢动目标检测性能的提高,针对现有方

2007-10-30 收稿, 2007-12-11 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60772045)、武器装备预先研究项目(批准号: 41322020401)和国防科技大学博士创新基金资助项目

^{**} E-mail: shigongtao@sina.com.cn

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

法中存在的不足, 本文从 ATI 干涉图幅度和相位的联合统计特性入手, 首先推导了不同杂波环境下的联合分布. 进而, 通过确定杂波 ATI 幅度-相位图的零相顶点(即相位为 0 时对应的幅度值最大点), 以该顶点对应的联合分布等高线作为包络检测曲线(此条检测曲线能够精确地包含杂波数据的 ATI 幅度相位图). 在此基础上, 结合 ATI 幅度、相位滤波处理实现精确的动目标检测. 实验表明: 所提检测方法有效地扩展了动目标的可检测速度范围, 且具有较强的稳健性和适应性, 应用价值较大.

1 ATI 干涉图幅度和相位的联合分布

Frery 等^[13]把目标检测面临的杂波环境分为 3 类: 均匀区域, 不均匀区域, 极度不均匀区域. 对于单通道的 SAR 数据, 在场景具有恒定 RCS 背景的理想情况下, 由 SAR 相干成像机理推导得到相干斑模型^[14], 此模型对于高分辨的同质均匀区域如草地、农田等是有效的. 而实际中更多的场景是 RCS 具有一定起伏的不均匀区域, 甚至是包含大量人造目标的城区等极度不均匀区域. 目前为止, 针对不均匀区域杂波的统计建模, 在乘积模型^[15]的体制下, 已经发展了两种应用广泛、比较著名的统计模型——K 分布^[16]和 G^0 分布^[13]. 相对而言, 由于 G^0 分布中 RCS 起伏分量幅度服从逆方根 Gamma 分布, 此分布不但包含方根 Gamma 分布(对应 K 分布)对均匀区域、不均匀区域的建模能力, 而且进一步扩展到对极度不均匀区域地物 RCS 起伏的建模能力.

对于多通道数据, 复 Wishart 分布是一个应用广泛的统计模型, 然而, 其建模对象是数据的协方差矩阵, 不能对杂波环境进行精细的划分. 因此, 在复 Wishart 分布^[17]的基础上, 根据乘积模型并结合逆方根 Gamma 分布对均匀区域、不均匀区域和极度不均匀区域的 ATI 幅度和相位联合分布进行推导.

1.1 均匀区域

根据中心极限定理, 杂波背景的 RCS 恒定时斑点噪声分量的 I 、 Q 通道服从零均值的 Gauss 分布, 具备了复 Wishart 分布的前提条件. 假设双通道 n 视样本协方差矩阵为

$$\mathbf{R} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mathbf{Z}(k) \mathbf{Z}(k)^H =$$

$$\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} |z_1(k)|^2 & z_1(k)z_2(k)^* \\ z_1(k)^*z_2(k) & |z_2(k)|^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 n 表示独立样本的个数, $\mathbf{Z}(k) = [z_1(k), z_2(k)]^T$ 为第 k 次单视图像, $*$ 表示复共轭, H 表示复共轭转置. \mathbf{R} 的副对角线元素 $(1/n) \sum_{k=1}^n z_1(k)z_2(k)^*$ 称为复多视 ATI 干涉图. 由文献[17]可知随机矩阵 $\mathbf{G} = n\mathbf{R}$ 服从著名的复 Wishart 分布. 而协方差矩阵 \mathbf{C} 为

$$\mathbf{C} = E[\mathbf{Z}\mathbf{Z}^H] = \begin{bmatrix} C_{11} & \sqrt{C_{11}C_{22}}\rho e^{j\theta} \\ \sqrt{C_{11}C_{22}}\rho e^{-j\theta} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)式中, $\rho e^{j\theta}$ 为两通道输出的复相关系数, ρ 称为相关度. 由于接收机热噪声、相干斑起伏噪声等的影响产生去相关, 地面场景相关度的值一般处于 0.95—0.99 之间. 另外, 对于陆地场景而言, θ 只与成像几何和场景海拔有关, 通常可假设为零.

对 Wishart 分布中的 4 个变量进行标准化处理, 再对主对角线元素进行积分可得标准化的 ATI 干涉图幅度 ξ 和相位 ψ 的联合分布为^[18]

$$p(\xi, \psi) = \frac{2n^{n+1} (1-\rho^2)^{n-1} \eta^n}{\pi \Gamma(\frac{n}{2})} \exp\left[2n\rho\eta \cos\psi\right] K_{n-1}(2n\eta) \quad (3)$$

其中 $\eta = \xi / (1 - \rho^2)$, $K_{n-1}(\cdot)$ 为 $n-1$ 阶第二类型修正 Bessel 函数, ATI 干涉图相位 ψ 取为 $\arg\{(1/n) \sum_{k=1}^n z_1(k)z_2(k)^*\}$, 而标准化的 ATI 幅度 ξ 为

$$\xi = \frac{|(1/n) \sum_{k=1}^n z_1(k)z_2(k)^*|}{\sqrt{E(|z_1|^2)E(|z_2|^2)}} = \frac{|(1/n) \sum_{k=1}^n z_1(k)z_2(k)^*|}{\sqrt{C_{11}C_{22}}} \quad (4)$$

从而有标准化的 n 视 ATI 干涉图为 $I_n = \xi e^{j\psi}$. 当 $n=1$ 时单视联合分布的幅度-相位等高线分布如图 1 所示.

1.2 不均匀区域

不均匀区域的 RCS 具有一定的起伏, 此时如若利用均匀区域的 ATI 干涉图幅度分布^[11]对不均匀区域的幅度数据进行拟合时, 表现出较大的偏差,

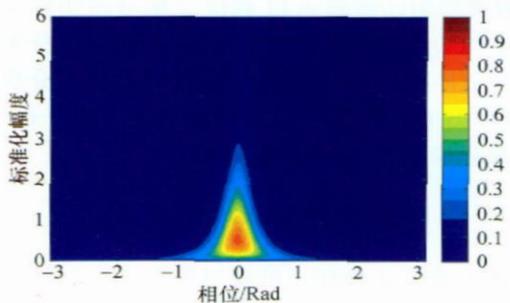


图 1 均匀区域 ATI 幅度和相位联合 pdf 的等高线示意图
($\rho \approx 0.9622$)

如图 2(a) 中区域 1, 2 所示. 为此引入乘积模型^[15]

$$Z_i = A_i X_i \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

其中 A_i (代替均匀区域的常量 $\sqrt{C_i}$) 代表的是地物后向散射 RCS 分量, $X_i \sim \mathcal{N}^G(0, 1)$ 表示斑点噪声分量, i 为第 i 个独立接收通道. 根据中心极限定理, 斑点噪声幅度分量 X_i 服从单位均值 Γ^2 (方根 Gamma) 分布. 此时不均匀区域的 n 视 ATI 干涉图 I'_n 变为

$$I'_n = \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A_1(k) A_2(k)^* X_1(k) X_2(k)^* \right] \quad (6)$$

从(6)式可以容易发现, 其直接应用乘积模型进行进一步推导非常困难. 实际中, 对于整个不均匀区域而言 RCS 是起伏的, 但是相邻几个分辨单元的 RCS 通常可假设具有恒定值. 也就是说, 当利用邻域窗口来构造采样协方差矩阵时, 可假设地物杂波的 RCS 起伏长度大于或等于邻域窗口的宽度, 地物杂波有相对较长的相关性, 从而邻域窗口内的地物后向散射 RCS 可认为是恒定的, 即 $A_i(k) \equiv A_i, i=1, 2$; 同时假设两通道能量平衡, 进而 $A_i \equiv A$. 从而(6)式简化为

$$I'_n = A^2 \left[\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_1(k) X_2(k)^* \right] = A^2 I_n = A^2 \xi e^{j\psi} \quad (7)$$

设 $A \sim \Gamma^{1/2}(\alpha, \gamma)$, 令 $W=A^2$, 强度 W 的概率密度函数(pdf)为

$$p_w(w) = \frac{\gamma^\alpha}{\Gamma(\alpha)} w^{-\alpha-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{w}\right) \quad \alpha, \gamma > 0 \quad (8)$$

其中 α 为形状参数, 本质上反映了被测区域的均匀度, $\alpha \in (0, \infty)$ 表明该分布可以覆盖均匀度变化下的广泛杂波区域的建模问题; γ 为尺度参数, 与被测区域的平均能量有关. 地物后向散射分量 RCS 强度的均值为 $E(W) = \gamma/(\alpha-1)$, 详细推导见附录 1. 据文献[11, 19, 20]的分析, 均匀区域的 ATI 相位分布也能够有效地匹配不均匀区域杂波数据的 ATI 相位, 如图 2(b) 所示. 从而不均匀区域的 ATI 幅度和相位的联合分布可利用乘积模型求解.

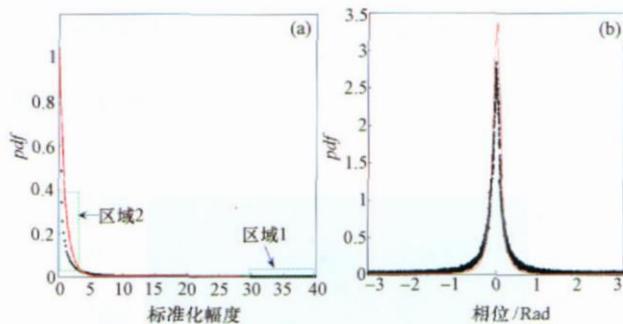


图 2 均匀区域的 ATI 幅度 pdf 和 ATI 相位 pdf 分别对不均匀区域数据(服从 K 分布)的拟合
($\rho \approx 0.9891$)

- (a) 均匀区域 ATI 幅度 pdf 和不均匀区域杂波数据的幅度直方图;
- (b) 均匀区域 ATI 相位 pdf 和不均匀区域杂波数据的相位直方图

令 $\Xi = A^2 \xi = W \xi$, 根据乘积模型有:

$$p(\Xi, \psi) = \int_0^\infty p_w(w) p(\Xi | w, \psi) dw \quad (9)$$

其中 $p_w(w)$ 如(8)式所示, $p(\Xi | w, \psi)$ 与 RCS 为常数时的 ATI 幅度和相位的联合分布 $p(\xi, \psi)$ 有关, 即:

$$p(\Xi | w, \psi) = \frac{1}{w} p\left[\frac{\Xi}{w}, \psi\right] = \frac{2n^{n+1} \Xi^n}{\pi \Gamma(n) (1-\rho^2)} \left(\frac{1}{w}\right)^{n+1} \exp\left[\frac{2n\Xi\rho\cos\psi}{1-\rho^2} \frac{1}{w}\right] K_{n-1}\left[\frac{2n\Xi}{1-\rho^2} \frac{1}{w}\right] \quad (10)$$

由(8)–(10)式可得:

$$p(\Xi, \psi) = \frac{2n^{n+1} \Xi^n \gamma^\alpha}{\pi \Gamma(n) \Gamma(\alpha) (1-\rho^2)} \int_0^\infty \left(\frac{1}{w}\right)^{n+\alpha+2} \exp\left[\left(\frac{2n\Xi\rho\cos\psi}{1-\rho^2} - \gamma\right) \frac{1}{w}\right] K_{n-1}\left(\frac{2n\Xi}{1-\rho^2} \frac{1}{w}\right) dw \quad (11)$$

作变量替换 $x=1/w$, 并令 $\Xi' = \Xi/E(W) = (\alpha-1)\Xi/\gamma$ 作标准化处理, 根据文献[21], 积分得到不均匀区域标准化的 ATI 干涉图幅度 Ξ' 和相位 ψ 的联合分布为:

$$p(\Xi', \psi) = \frac{\kappa \lambda^{2n} \gamma^\alpha}{2\sqrt{\pi} \Gamma(n) (1-\rho^2)^{-(n+\alpha)}} \cdot \left[(1-\rho^2) \gamma + \lambda \Xi' (1-\rho \cos \psi) \right]^{-2(n+\alpha)} (\Xi')^{2n-1} {}_2F_1(2n+\alpha, n-1/2; n+\alpha+3/2; Q) \quad (12)$$

其中 $Q = \frac{(1-\rho^2)\gamma - \lambda \Xi' (1+\rho \cos \psi)}{(1-\rho^2)\gamma + \lambda \Xi' (1-\rho \cos \psi)}$, $\kappa = \frac{\Gamma(2n+\alpha) \Gamma(\alpha+2)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(n+\alpha+3/2)}$, $\lambda = 2n\gamma/(\alpha-1)$. 当 $n=1$ 时, (12) 式的幅度-相位等高线分布如图 3 所示.

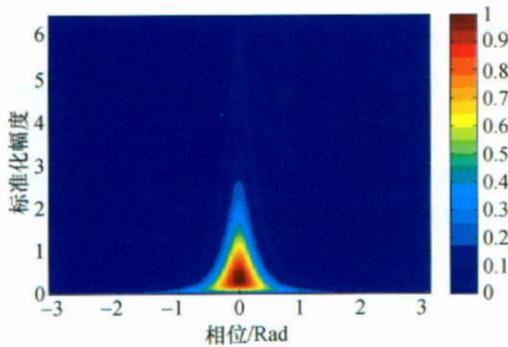


图 3 不均匀区域 ATI 幅度和相位联合 pdf 的等高线示意图
($\hat{\rho} = 0.9593$, $\hat{\alpha} = 5.0224$, $\hat{\gamma} = 4.015$)

1.3 极度不均匀区域

对于城区等极度不均匀区域, 其含有多种的异质成分, 直方图拖尾严重, 分辨单元间 RCS 起伏较大, 导致邻域窗口内各分辨单元的 RCS 变量 $A_i(k)$, $1 \leq k \leq n$ 不再相等, (7) 式所示模型不再成立.

对于 SAR 图像域地面慢动目标检测应用而言, 此时动目标仍能清晰地成像, 因而对 ATI 幅度数据直方图拖尾的精确拟合是至关重要的, 依此对极度

不均匀区域进行建模时, 可作两点简化处理: (i) 假设均匀区域的 ATI 相位 ψ 的分布仍能够拟合极度不均匀区域杂波数据的 ATI 相位, 但分布的参数估计值不同; (ii) 假设邻域窗口内的各分辨单元的 RCS 仍是相等的, 只是幅值更大. 基于这两点, 采用乘积模型, (7) 式可扩展为:

$$I_n'' = (A^2 \xi)^\delta e^{j\psi}, \quad \delta \in \mathbb{R} > 0 \quad (13)$$

(13) 式中参数 δ 旨在提高对极度不均匀区域的直方图的幅值较大区域的拟合精度. 令 $U = (A^2 \xi)^\delta = \Xi^\delta$, Jacobi 系数为 $1/\delta u^{1-1/\delta}$, 同时利用 $U = \frac{\Gamma(\alpha-\delta)\gamma^\alpha}{\Gamma(\alpha)\gamma^{\alpha-\delta}} U'$ 标准化 ATI 幅度后, 得到极度不均匀区域 ATI 幅度 U' 和相位 ψ 的联合分布为:

$$p(U', \psi) = \frac{\kappa (2n)^{2n} \gamma^\alpha}{2\sqrt{\pi} \delta \Gamma(n) (1-\rho^2)^{-(n+\alpha)}} \cdot \left[(1-\rho^2) \gamma + 2n(\xi U')^{1/\delta} (1-\rho \cos \psi) \right]^{-2(n+\alpha)} \xi^{2n/\delta} \cdot (U')^{(2n/\delta)-1} {}_2F_1(2n+\alpha, n-1/2; n+\alpha+3/2; Q') \quad (14)$$

其 $Q' = \frac{(1-\rho^2)\gamma - 2n(\xi U')^{1/\delta} (1+\rho \cos \psi)}{(1-\rho^2)\gamma + 2n(\xi U')^{1/\delta} (1-\rho \cos \psi)}$, $\xi = \frac{\Gamma(\alpha-\delta)\gamma^\alpha}{\Gamma(\alpha)\gamma^{\alpha-\delta}}$. 当 $n=1$ 时极度不均匀区域的联合分布的幅度-相位等高线分布如图 4 所示.

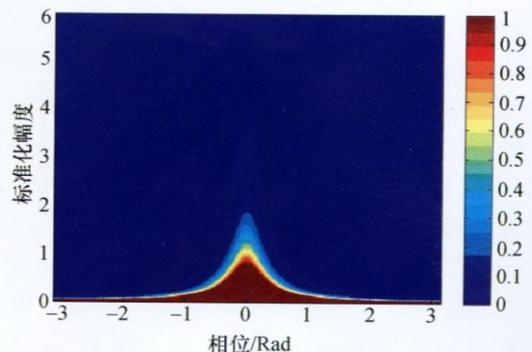


图 4 极度不均匀区域 ATI 幅度和相位联合 pdf 的等高线示意图
($\hat{\rho} = 0.9593$, $\hat{\alpha} = 5.0224$, $\hat{\gamma} = 4.015$, $\hat{\delta} = 2.0155$)

1.4 3 种联合分布的关系

由前面的推导过程可得: 当扩展形状参数 $\delta \rightarrow 1$ 时, 极度不均匀区域的联合分布 $p(U', \psi)$ 依分布收敛于不均匀区域的联合分布 $p(\Xi', \psi)$. 而不均匀

区域的联合分布 $p(\Xi', \psi)$ 是在乘积模型的框架下, 假设 RCS 分量幅度服从逆方根 Gamma 分布的条件下由均匀区域的联合分布 $p(\xi, \psi)$ 推导得到的. 令 $\alpha, \gamma \rightarrow \infty$ 且 $\alpha/\gamma \rightarrow \sigma$ 时, 服从逆方根 Gamma 分布的 RCS 起伏分量退化一个常数 σ (即为恒定的 RCS 值), 标准化此 RCS 值 ($\sigma=1$) 即可得到 $p(\xi, \psi)$, 也就是说, $p(\Xi', \psi)$ 也依分布收敛于 $p(\xi, \psi)$. 三者关系如图 5 所示, 其中, \xrightarrow{D} 表示依分布收敛. 由上面讨论可知, 极度不均匀区域的联合分布模型包含有均匀区域、不均匀区域的建模能力, 即联合分布具有“向下兼容性”.

$$p(U', \psi) \xrightarrow[\frac{\alpha, \gamma \rightarrow 0}{D}]{\delta \rightarrow 1} p(\Xi', \psi) \xrightarrow[\frac{\alpha, \gamma \rightarrow \infty}{D}]{\frac{\alpha, \gamma \rightarrow 1}{D}} p(\xi, \psi)$$

图 5 均匀区域、不均匀区域和极度不均匀区域对应的不同联合 pdf 之间的关系

2 参数估计

2.1 相关度 ρ

一般地, 相关度 ρ 的估计通过 $\hat{\rho} = |\sum_{k=1}^n z_1(k) z_2(k)^*| / \sqrt{\sum_{k=1}^n |z_1(k)|^2 \sum_{k=1}^n |z_2(k)|^2}$ 来实现²³. 估计量 $\hat{\rho}$ 的概率密度函数为 $p(\hat{\rho}) = 2(n-1)(1-\rho^2)^n \hat{\rho} (1-\rho^2)^{n-2} {}_2F_1(n, n; 1; \rho^2 \rho^2)$, 进而有 $\hat{\rho}$ 的一阶矩为 $E(\hat{\rho}) = \frac{\Gamma(n) \Gamma(3/2)}{\Gamma(n+1/2)} (1-\rho^2)^n {}_3F_2(3/2, n, n; n+1/2, 1; \rho^2)$. 然而, 该经典估计量是有偏的, 但随着 n 的增大估计量偏差越来越小, 是一个渐进无偏估计量, 如图 6(a) 所示.

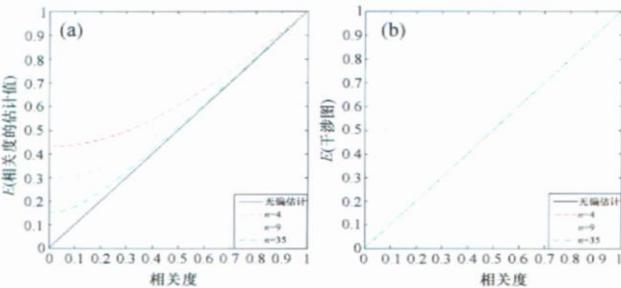


图 6 视数 $n=4, 9, 35$ 时的相关度估计偏差
(a) 经典估计法的估计偏差 (b) 本文无偏估计法的估计偏差

$z_1(k) z_2(k)^* / \sqrt{E(|z_1|^2) E(|z_2|^2)}$, 其一阶矩(详细推导见附录 2)为 $E(I_n) = \rho$, 如图 6(b) 所示. 理论推导表明(见附录 2), 不论 n 取何值 $E(I_n)$ 都是 ρ 的无偏估计量. 从而利用标准化的干涉图便可实现相关度的无偏估计:

$$\hat{\rho} = E(I_n) \quad (15)$$

(15) 式是在均匀区域下推导而得的, 对于不均匀区域, 当两通道被精确校准, 同时邻域窗口内地物后向散射 RCS 恒定时, 根据(7)式可知, 地物后向散射变量 A 被抵消, 所以均匀区域的相关度估计量 $\hat{\rho}$ 对于不均匀区域仍然有效; 进一步, 对于极度不均匀区域, 由(13)式可知, 地物后向散射分量仍能被抵消, (15)式的估计同样适用.

2.2 尺度参数 γ 、形状参数 α 和扩展参数 δ

不均匀区域的干涉幅度 Ξ 服从 p 分布^[11], 其 k 阶矩为 $m_k = E(\Xi) = \beta^{-k} B(n+k, \gamma-k) / B(n, \gamma)$, 其中, $\beta = 2n/\alpha(1+\rho)$. 通过一、二阶矩并利用 $B(n, \alpha) = \Gamma(n) \Gamma(\alpha) / \Gamma(n+\alpha)$, $\Gamma(\alpha) = (\alpha-1) \Gamma(\alpha-1)$ 得到尺度参数的估计量为:

$$\hat{\gamma} = \frac{2nm_2 - \left(\frac{n+1}{m_1}\right) m_1^2}{mm_2 - \left(\frac{n+1}{m_1}\right) m_1^2} \quad (16)$$

其中一阶矩的矩估计值为 $\hat{m}_1 = 1/M \sum_{k=1}^M \Xi_k$ (M 为 ATI 幅度像素的个数), 二阶矩的矩估计值为 $\hat{m}_2 = 1/M \sum_{k=1}^M \Xi_k^2$. 估计得到尺度参数 γ 后, 带回到一阶矩中求得形状参数 α ^[11]. 再结合极度不均匀区域的干涉幅度 U 的 k 阶矩 $E(U^k) = \beta^{-k} B(n+\delta k, \gamma-\delta k) / B(n, \gamma)$ 便得到扩展参数估计量 $\hat{\delta}$ ^[11].

3 检测算法

3.1 算法原理

图 7(a) 给出了一幅典型的 SAR-ATI 杂波幅度相对于相位的关系图, 图 7(c) 是一幅包含动目标和静止目标的 ATI 幅度—相位图, 它们分别与理论推导的 ATI 幅度和相位联合分布的等高线图(如图 7(b), (d) 所示) 相比, 具有如下特点:

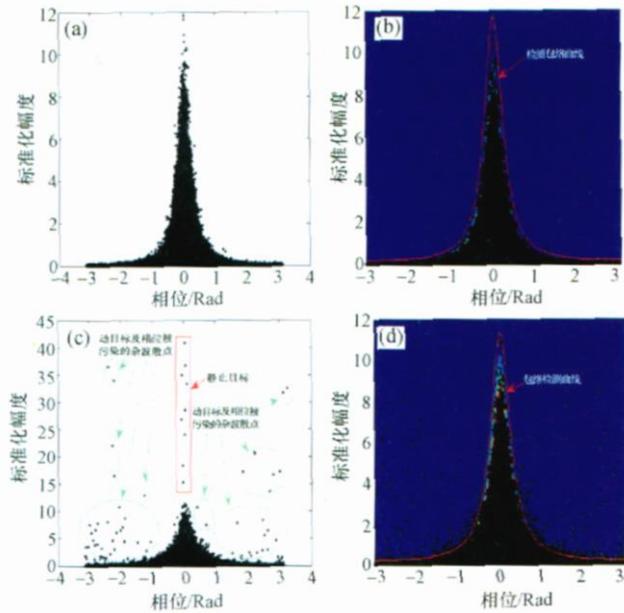


图 7 ATI 幅度—相位图、ATI 幅度和相位联合

pdf 的等高线图 ($\rho = 0.9622$) 和包络检测曲线示意图

(a) 噪声和杂波 ATI 幅度—相位图; (b) ATI 幅度和相位联合 pdf 的等高线图和包络检测曲线叠加在杂波 ATI 幅度—相位图上; (c) 杂波中加入 3 个动目标和一个静止目标的 ATI 幅度—相位图; (d) ATI 幅度和相位联合 pdf 的等高线图和包络检测曲线叠加在 (c) 对应的 ATI 幅度—相位图上

(1) 杂波和噪声点能够被一条合适的理论幅度—相位等高线包含在里面, 也就是说, 当利用此条等高线作为门限检测曲线时, 能够有效地去除杂波和噪声。

(2) 对于慢动目标而言, 由于径向速度的存在使对应的 ATI 像素点具有较大的相位, 同时采用静止目标的匹配滤波器对慢动目标成像会使对应的 ATI 像素点具有较大的幅度值, 因而慢动目标的信号点在幅度—相位图中表现为“奇异散点”, 分布在包络检测曲线之外, 如图 7(c) 中椭圆圈所注。

基于上述两点分析, 通过确定杂波 ATI 幅度—相位图的零相顶点, 以该顶点对应的联合分布等高线作为包络检测曲线, 把相位从 $-\pi$ 到 π 划分为 N (N 足够大) 个区间 $[\psi_{i-1}, \psi_i]$ ($1 \leq i \leq N$), 每个区间对应的包络曲线幅值为 ζ_i . 对每一个 ATI 像素点 P (相位值 ψ_P , 幅度值 S_P), 判断此像素为动目标像素或杂波像素的条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{像素点 } P \text{ 为动目标像素,} \\ \quad \text{如果 } \psi_P \in [\psi_{i-1}, \psi_i] \text{ 且 } S_P > \zeta_i, \\ \text{像素点 } P \text{ 为杂波像素,} \\ \quad \text{如果 } \psi_P \in [\psi_{i-1}, \psi_i] \text{ 且 } S_P \leq \zeta_i \end{array} \right. \quad (17)$$

以此在 ATI 干涉图内对像素点进行遍历即可实现动目标的检测。

完整的动目标检测算法如图 8 所示, 其实现过程可概括为: 首先, 由配准的前向、后向通道的 SAR 复图像经过共轭相乘后得到 ATI 干涉图, 再对 ATI 干涉图幅度进行标准化处理. 对标准化的 ATI 干涉图进行全局幅度筛选, 筛选掉可能为目标的 D 个像素点 (即筛选深度 D), 在筛选后的 ATI 干涉图中查找相位为零、幅值最大的点 M , 保存点 M 的幅度和相位信息; 同时, 由筛选剩余的所有像素点进行参数 $\beta, \alpha, \gamma, \delta$ 的估计, 得到 ATI 干涉图幅度和相位联合分布的等高线图. 在此基础上, 以点 M 对应的联合分布等高线作为包络检测曲线. 另外, 利用 ATI 相位预滤波滤除 ATI 干涉图中幅度较大但相位却较小的静止目标点和杂波散点; 而通过 ATI 幅度预滤波去除掉 ATI 干涉图中相位较大但幅度较小的杂波散点. 最后, 以包络相位检测曲线作为检测函数对经过预滤波处理的 ATI 干涉图进行检测, 并二值化该检测结果, 最终得到潜在的动目标区域。

3.2 算法说明

3.2.1 ATI 全局幅度筛选

慢速运动目标与静止目标一样较之自然杂波背景具有更强的雷达散射, 在经过匹配滤波后, 它们在图像中都表现为一些相对较少、整体相对比较亮的“异常点”. 其中, 对应于静止目标的 ATI 像素“异常点”分布在幅度—相位图的相位零附近且幅值较大 (如图 7(c) 中方框所注). 在利用相位为零且幅值最大的点确定包络检测曲线时, 这些静止目标“异常点”会被误认为杂波, 造成包络检测曲线对杂波 ATI 幅度—相位图的过拟合, 导致检测性能下降. 此外, 幅值和相位都较大的动目标“异常点”虽然不会影响包络检测曲线的确定, 但这些点会造成参数估计精度的下降以及 ATI 幅度、相位预滤波阈值的偏大, 同样也会影响检测算法性能。

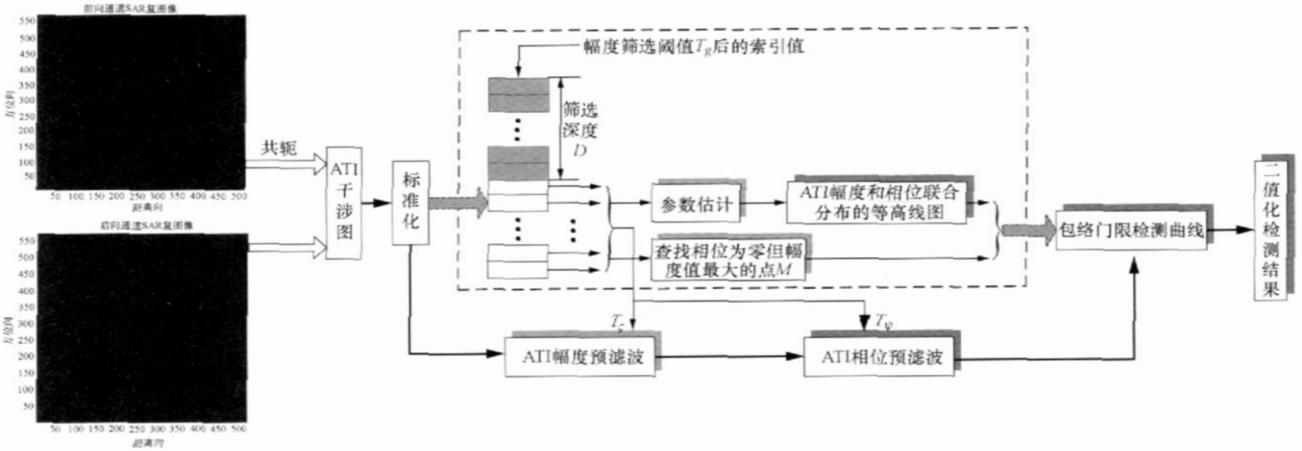


图 8 基于 ATI 幅度和相位联合分布的双通道 SAR 地面慢动目标检测流程图

基于上述原因，通过采用一个合适的 ATI 幅度全局阈值 T_g ，判断每个像素的属性并赋予相应的索引值，对于 ATI 幅度大于全局阈值 T_g 的像素，认为可能是目标像素（运动目标或静止目标），赋予索引值 1，反之索引值为 0。进而利用索引值为 0 的像素进行参数估计、幅度和相位预滤波阈值求解以及包络检测曲线的确定，提高动目标的检测性能。

3.2.2 ATI 幅度预滤波 ATI 干涉图相位由于多种因素的影响，造成具有较大相位的像素点并不一定是动目标点。这些相位被污染的杂波点会偏移 to 包络检测曲线之外，检测时会产生很多虚警点。具体原因有：

(1) 相位漂移的影响：典型的地杂波的 ATI 复平面图如图 9(a) 所示，横轴为实部，纵轴为虚部；图 9(b) 则为一个单点运动目标的 ATI 复平面图，图中表明：一个点目标在 ATI 复平面图中扩展分布在一条直线上，对应该点目标成像压缩后的主瓣和旁瓣。推而广之，对于 ATI 复平面图中的每一个像素点，都是由一簇相位（该相位称之为像素的真实相位）相同的点组成，这一簇点分别对应于相邻像素点的同相旁瓣和该点像素的主瓣。此时，ATI 干涉图中的每一个像素点的检测相位因为相邻像素的旁瓣影响而偏离真实相位，产生相位漂移^[23]。具体表现为：(i) 当杂波场景 RCS 恒定或起伏不大时，因为线性调频信号脉冲压缩后其峰值旁瓣比理论值可达到 -13.26 dB，再经过加窗处理后其值可以达到 -20 dB 以下^[24]，此时可认为相邻像素对中心像素的相位漂移影响不大；

(ii) 若杂波背景中存在强散射静止目标时，对其周围像素相位漂移的影响就不可以忽略，周围杂波的相位被污染后呈现出运动目标的相位特征，但通常幅度较小；(iii) 如果强散射点为动目标，周围静止弱杂波的相位污染会更严重，污染的像素点数更多，在利用包络检测曲线进行动目标检测时，造成包含动目标的区域增大，不利于动目标的精确定位；

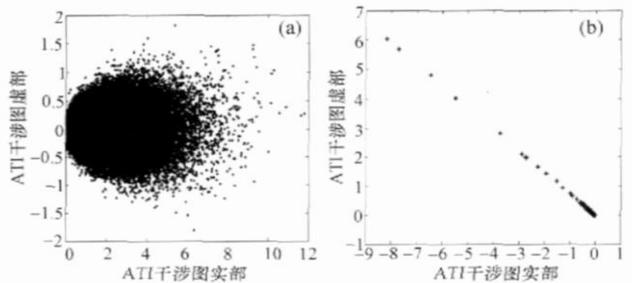


图 9 ATI 复平面图

- (a) 典型的地杂波 ATI 复平面图；
- (b) 单点运动目标 ATI 复平面图

(2) 噪声的影响：配准的前向、后向通道的 SAR 复图像是同一场景在不同时刻拍摄的两幅图像，造成两通道之间存在相干斑起伏噪声，同时每个通道又都存在加性接收机热噪声。随机噪声的存在产生去相关的同时，也会使各点的 ATI 相位值产生一定的随机性，呈现出不规律的变化，此时某些杂波散点会有较大的相位值，偏移 to 包络检测曲线之外。

不论是由相位漂移还是噪声影响产生的具有较大

ATI 相位的杂波点, 它们相对于慢动目标而言, 其 ATI 幅度都较小. 因此, 通过设置一个合适的幅度阈值 T_ζ , 对每一个 ATI 幅度点 ζ_{ATI} , 如果 $\zeta_{ATI} < T_\zeta$, 则去除此点, 否则保留. 以此在 ATI 干涉图内对像素点进行遍历即可有效地滤除这些相位较大的杂波散点.

3.2.3 ATI 相位预滤波 与 ATI 幅度预滤波不同, 对 ATI 干涉图进行相位预滤波的主要目的是为了去除静止目标, 因为:

(1) 静止目标相对于杂波背景有较大的对比度, 静止目标作为杂波背景中的奇异点, 一般具有较大的 ATI 幅度和较小的 ATI 相位, 表现在 ATI 幅度—相位图上, 相位零附近有许多幅值较大的稀疏点;

(2) 为了精确拟合杂波 ATI 干涉图, 只利用了索引值为 0 的像素点来确定包络检测曲线, 此时, 这些幅值较大的静止目标点可能被筛选掉. 也就是说, 它们可能位于包络检测曲线之外.

通过设置一个合适的相位阈值 T_ψ : 对每一个 ATI 相位点 ψ_{ATI} , 如果 $\psi_{ATI} < T_\psi$, 则去除此点, 反之保留. 以此遍历每个 ATI 相位点便可有效滤除那些幅值较大的静止目标点.

3.3 算法描述

(1) 全局筛选阈值 T_g 的求解

目标像素位于 ATI 干涉图幅度直方图的拖尾部分, 因此利用干涉图幅度的直方图可以自适应的确定 T_g . 设 ζ 为对应 ATI 干涉图幅度的随机变量, 则在给定目标像素的置信度为 $1-\varphi$ 的条件下, T_g 由下式确定:

$$P\{\zeta > T_g\} = 1 - \varphi \quad (18)$$

其中 P 表示概率值, $\varphi \in [0, 1]$ 为经验值, 其物理含义表示杂波像素在 ATI 干涉图中所占的比例. 在大幅 SAR 图像中, φ 的取值较大接近 1. 进一步, 由 ATI 幅度的概率密度函数^[11] 得到累积分布函数 F , 从而(18)式可改写为:

$$1 - F(T_g) = 1 - \varphi \quad (19)$$

利用(19)式即可方便地求得 T_g .

另外, 设待检测 ATI 干涉图的大小为 $M \times N$, 在位置 (i, j) 处的 ATI 幅度为 $\zeta_{i,j}$, 定义点 (i, j)

处的索引值为 $Y_{i,j}$, 有:

$$Y_{i,j} = \begin{cases} 1, & \zeta_{i,j} > T_g \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

那么 ATI 干涉图的索引矩阵为: $\mathbf{Y} = \{Y_{i,j} \mid 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N\}$.

(2) ATI 幅度、相位预滤波阈值 T_ζ , T_ψ 的求解
幅度预滤波是为了去除相位被污染的杂波点, 因而可通过 $Y_{i,j} = 0$ 的所有 ATI 干涉图幅度点, 求解 T_ζ 为:

$$T_\zeta = k_1 \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q \zeta(i) \quad (21)$$

其中 Q 表示索引值为 0 的像素点个数, k_1 为可调常数. 当标准化 ATI 干涉图幅度后, k_1 的经验取值范围为 1—2.5, k_1 过大会造成速度相对较快的慢动目标的漏检.

ATI 干涉图相位直方图是以零点为轴对称分布, 利用所有索引值为 0 的 ATI 相位点, 求解 T_ψ 为:

$$T_\psi = k_2 \sigma_\psi \quad (22)$$

其中 σ_ψ 为 $Y_{i,j} = 0$ 的所有 ATI 相位点的统计标准差, k_2 为可调常数, 其经验取值范围为 1—2, 过大的 k_2 则会造成最小可检测速度的增大.

4 实验结果与分析

系统仿真参数设置如表 1—3 所示. 仿真了 3 个具有不同径向速度的运动目标和一个静止目标, 它们在图像中的位置如表 3 所示. 仿真的前向通道 SAR 图像如图 10(a)所示, 其中, 动目标 1, 2, 3 的信杂比(signal to clutter ratio, SCR)依次为 4.05, 4.25 和 4.32 dB, 静止目标的 SCR 为 5.10 dB, 杂噪比(clutter to noise ratio, CNR)为 1.25 dB.

根据仿真图像的先验知识, 设 $\varphi = 0.990$, 由(19)式求得标准化的 ATI 干涉图幅度筛选阈值 T_g 为 12.150; 标准化的 ATI 干涉图经过幅度筛选后生成索引矩阵 \mathbf{Y} , 在索引值为 0 的像素点中查找到 M 点的信息为 (0, 11.7850); 根据(15)式, 利用索引值为 0 的所有像素点求得相关度 ρ 的估计值为 0.9622; 通过杂波 ATI 幅度—相位图零相顶点的确

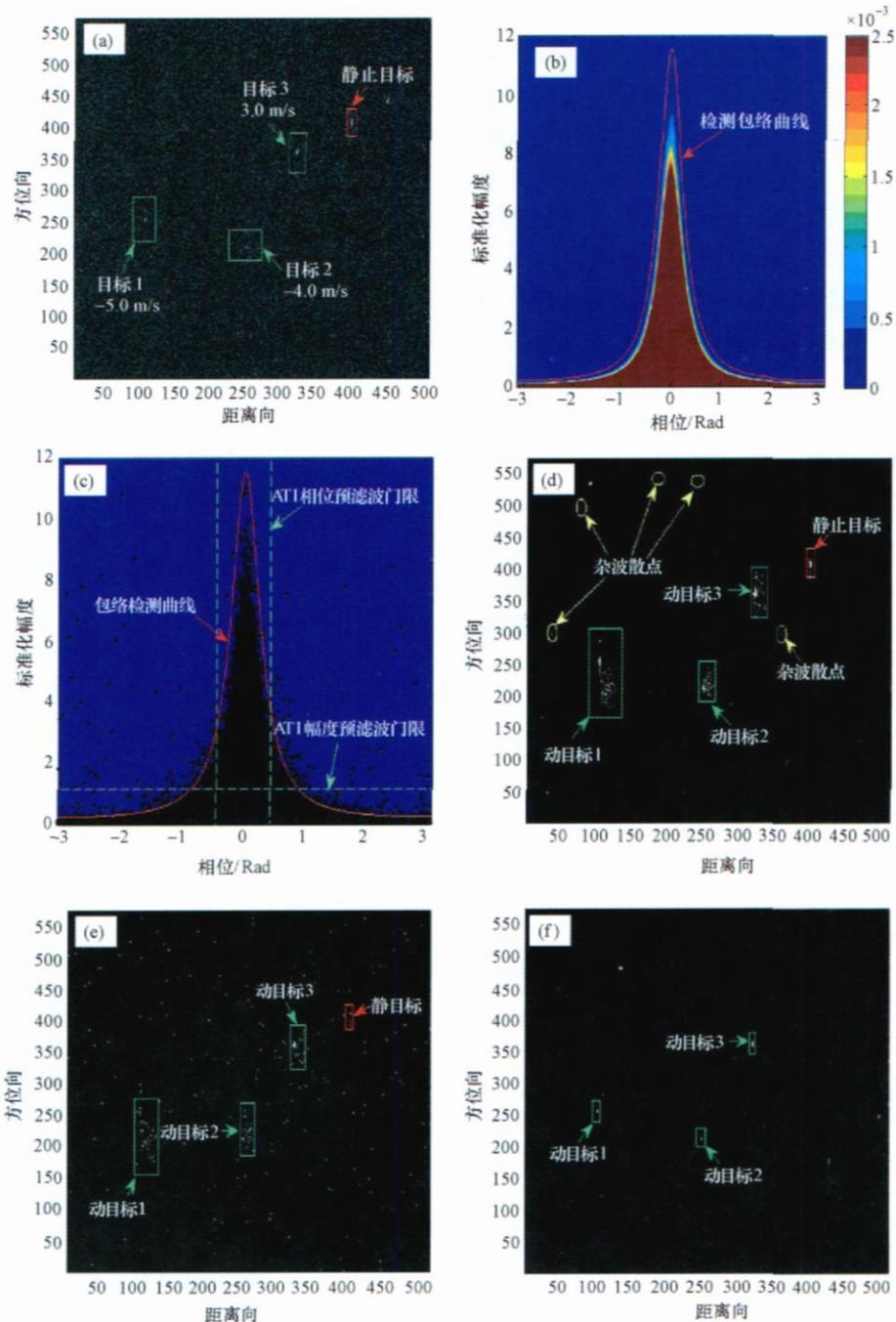


图 10 一幅仿真场景 SAR 图像的动目标检测的结果

(a) 前向通道 SAR 图像; (b) ATI 相位和幅度的联合 *pdf* 和等高线包络检测曲线; (c) 干涉复图像的 ATI 幅度—相位图、包络检测曲线和 ATI 幅度、相位预滤波门限; (d) 仅利用包络曲线进行检测的结果; (e) 利用经验拟合曲线进行检测的结果; (f) 经过 ATI 幅度、相位预滤波和包络曲线检测后的结果

定找出包络检测曲线, 如图 10(b) 中实曲线所示; 由先验知识得到 $k_1=2$, $k_2=1$, 根据(21), (22)式得到 ATI 幅度、相位预滤波的阈值分别为 $T_S =$

1.750 和 $T_\phi=0.480$, 如图 10(c) 中虚直线所示。

当直接利用包络检测曲线对 ATI 干涉图进行检测时, 检测结果如图 10(d) 所示, 图中表明:

(1) 左下3个矩形框对应3个动目标所在区域, 由于动目标与杂波相比有较强的对比度, 造成动目标周围杂波像素点的相位漂移. 这些相位被污染的杂波像素点偏移到包络检测曲线之外, 致使包含动目标的区域拓宽, 不利于动目标的精确定位; 右上一个矩形框为静止目标所在区域, 静止目标作为图像中的相对较亮的“异常点”, 对周围像素的相位漂移影响也不可忽略, 其周围杂波像素点也表现出动目标的相位特征, 产生虚警点. 同时, 静止目标本身在 ATI 干涉图中表现为相位较小但幅度值较大的像素点, 这些点在寻找包络检测曲线之前被筛选掉, 造成它们也位于包络检测曲线之外, 同样也形成虚警点;

(2) 椭圆小圈标注出的是杂波虚警散点, 它们主要是由于相干斑起伏噪声、接收机热噪声的影响, 使这些静止杂波散点的相位增大, 也漂移到包络检测曲线之外, 作为虚警散点被检测出, 但这些点的幅值却都相对较小.

表 1 系统参数设置

系统参数			
雷达工作距离/m	4000	发射脉冲宽度/ μs	1.0
载机飞行速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	76	发射信号带宽/MHz	180
波长/m	0.03	发射信号中心频率/GHz	10
脉冲重复频率/Hz	182	A/D 采样率/MHz	216
两孔径的距离/m	3.34	工作模式	正侧视
合成孔径时间/s	3.1579	天线尺寸 (方位/m \times 距离/m)	1.5×1.0

表 2 地面场景参数设置

地面场景参数			
场景图像大小	574×518	距离向分辨率 加权因子	1.2
方位向分辨率加权因子	1.2	距离向分辨率/m	1.0
方位向分辨率/m	1.0	杂波	Rayleigh 分布杂波

表 3 目标参数设置

目标参数	动目标 1	动目标 2	动目标 3	静止目标
径向速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5.0	-4.0	3.0	0
距离向位置(像素)	103	251	324	403
方位向位置(像素)	254	211	360	410

数^[10], 对 ATI 干涉图相位进行检测的结果. 比较图 10(d)和图 10(e), 可以发现: 强散射点对周围像素的相位污染都存在, 但经验拟合方式对 ATI 幅值较小的像素点拟合较差, 表现在图 10(e)中有众多的杂波虚警散点; 同时经验拟合方式对 ATI 幅值较大的像素点又存在过拟合现象, 当动目标的速度较小造成漏检.

经过 ATI 幅度、相位预滤波以及包络检测曲线检测后, 最终的检测结果如图 10(f)所示, 图中表明: 由于相位漂移和噪声的影响使其相位被污染的杂波像素点已被全部滤除, 同时, ATI 干涉图中对应的静止目标像素点虽然由于幅值较大位于包络检测曲线之外, 但利用其相位较小的特点也被有效地去除. 3 个动目标被精确地检测出来, 实现了高检测率、低虚警率的地面慢动目标检测.

为了更全面地评估本文检测算法的性能, 从 SCR、可检测速度范围和复杂杂波环境 3 个方面作进一步分析:

(1) SCR: 把 3 个动目标的 SCR 依次降为 -0.50 -0.46 和 -0.40 dB, 静止目标的 SCR 由 5.10 dB 降为 -0.50 dB, CNR 仍为 1.25 dB. 此时目标已完全淹没于杂波之中, 如图 11(a)所示. 通过杂波 ATI 幅度—相位图零相顶点的确定求取的包络检测曲线如图 11(b)中实曲线所示, 经过 ATI 干涉图幅度、相位预

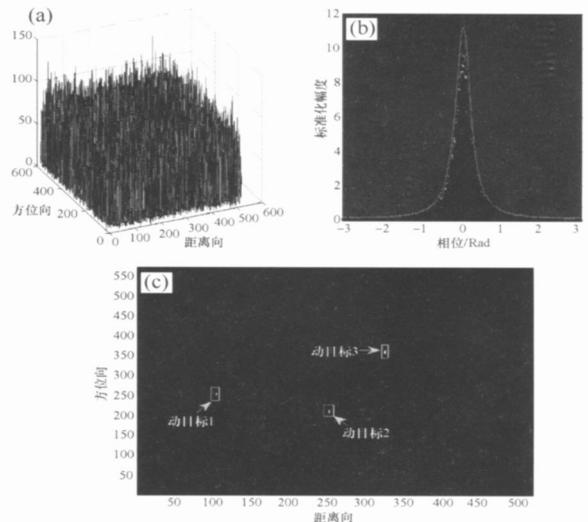


图 11 一幅低 SCR 的仿真 SAR 图像的动目标检测结果 (a) 强杂波单通道 SAR 图像; (b) 强杂波条件下的包络检测曲线和干涉复图像的 ATI 幅度—相位图 (c) 经过幅度、相位预滤波和包络曲线检测后的结果

图 10(e)是利用经验拟合方式拟合出相位检测函

滤波和包络检测曲线检测后, 强杂波和静止目标被去除, 仍能精确地检测出 3 个动目标, 如图 11(c)所示, 表明本文的检测方法对于杂波环境具有很强的鲁棒性, 即对于检测场景的 SCR 具有较强的稳健性.

值得注意的是, 通过比较图 10(d)和图 12 不难发现: 当 SCR 减小以后, 不论是静止目标还是运动目标, 其对周围杂波像素点的相位污染得到了有效抑制, 如图 12 中左下 3 个方框所标注出的区域, 仅仅检测出了动目标所在图像中对应位置的几个像素点, 包含目标的区域被有效地缩小, 有利于目标的准确定位. 仔细分析, 不难得出: 随着 SCR 的减小, 杂波幅度逐渐变大, 当增大到一定程度时, 目标被完全淹没于其中. 当杂波的幅度与目标处于同一数量级甚至强于目标时, 此时目标已经失去了“作为强散射点”的条件, 对周围像素点的相位漂移影响也就可以忽略, 类同于 RCS 恒定或起伏不大时的情形. 此时目标周围的这些像素点被包络检测曲线包含在内, 因此检测时得到了有效滤除. 此特性表明: 当 SCR 较小时, 不用通过 ATI 幅度、相位预滤波, 仅利用包络检测曲线检测后再结合简单的像素聚类^[23]即可实现动目标的精确检测, 这对于伪装的动目标检测具有一定的应用价值(因为伪装的动目标成像后 SCR 往往较低, 但其 ATI 相位明显区别于杂波, 对于上述讨论的情况适用).

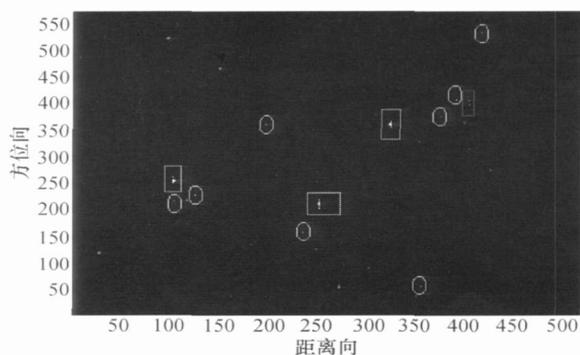


图 12 低 SCR 环境下仅用包络曲线进行动目标检测结果

(2) 可检测速度范围: 把动目标 2 的径向速度由 -4.0 m/s 调整为 -0.3 m/s , 而把动目标 3 的径向速度由 3.0 m/s 调整为 20.0 m/s , 其他参数保持不变. 为了进行对照分析, 对 Gierull 提出的基于 ATI 幅度分布和 ATI 相位分布的联合 CFAR 检测

方法进行了仿真^[11], 设幅度、相位检测的虚警率分别为 $P_{fa}^a=0.0060$ 和 $P_{fa}^p=0.0064$, 检测结果如图 13 所示; 所提算法的检测结果如图 14 所示. 对照图 13(c)和图 14(b)容易发现:

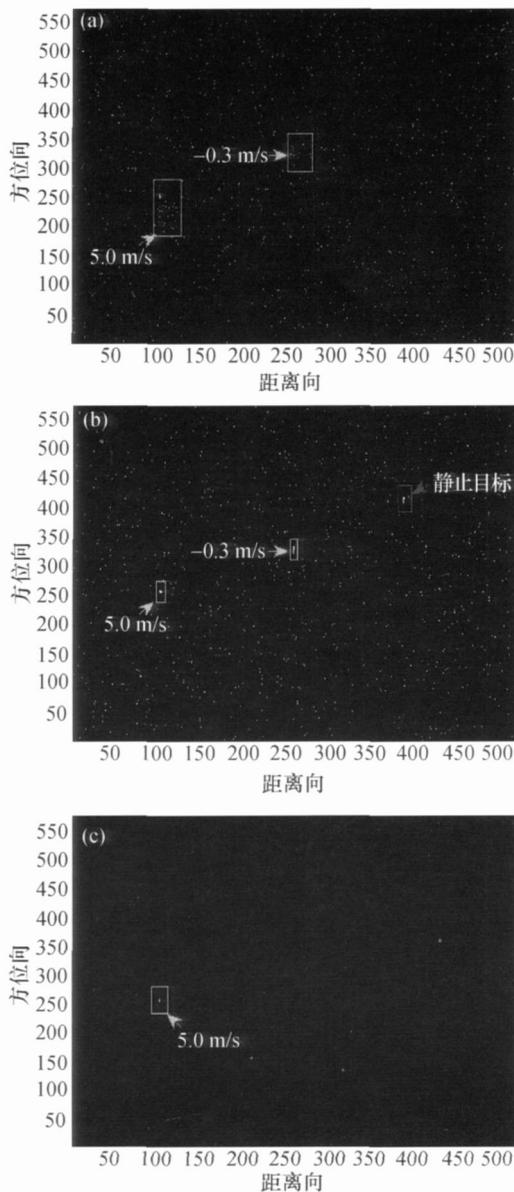


图 13 利用 ATI 幅度分布和 ATI 相位分布进行联合 CFAR 检测的结果

(a) ATI 相位分布的 CFAR 检测结果; (b) ATI 幅度分布的 CFAR 检测结果; (c) 联合 CFAR 检测的结果

(i) 两种方法都没有检测出径向速度为 20.0 m/s 的动目标 3, 造成漏检. 原因在于此目标的运动速度过快, 当利用静止目标的匹配滤波器对其进行压

缩成像时, 发生了严重的散焦, 甚至消失. 换句话说, 动目标 3 已经不具备复图像域动目标检测的先决条件——清晰成像, 因此基于图像域的多通道动目标检测方法检测该目标时都会失效. 不过, 对于快速运动目标的检测方法已经非常成熟, 如简单的频域滤波法^[4]即可;

(ii) 文献[11] 中的方法对速度为 -0.3 m/s 的动目标 2 也产生漏检, 而所提检测算法能精确地检测出此径向速度较小的目标. 文献[11] 漏检的原因在于运动目标的速度过小时, 其 ATI 相位相应的也会较小, 为了去除相位发生漂移的杂波像素点, 需要取较大的检测门限, 动目标 2 也被滤除. 如果要

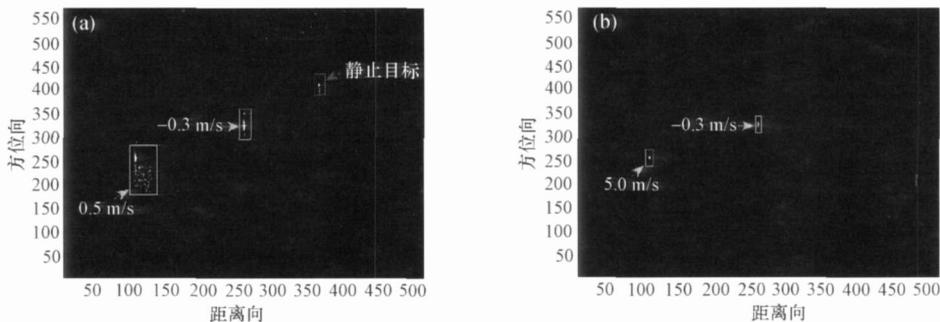


图 14 利用 ATI 幅度和相位联合分布的等高线进行检测的结果

(a) 仅利用包络曲线进行检测的结果; (b) 经过 ATI 幅度、相位预滤波和包络曲线检测后的结果

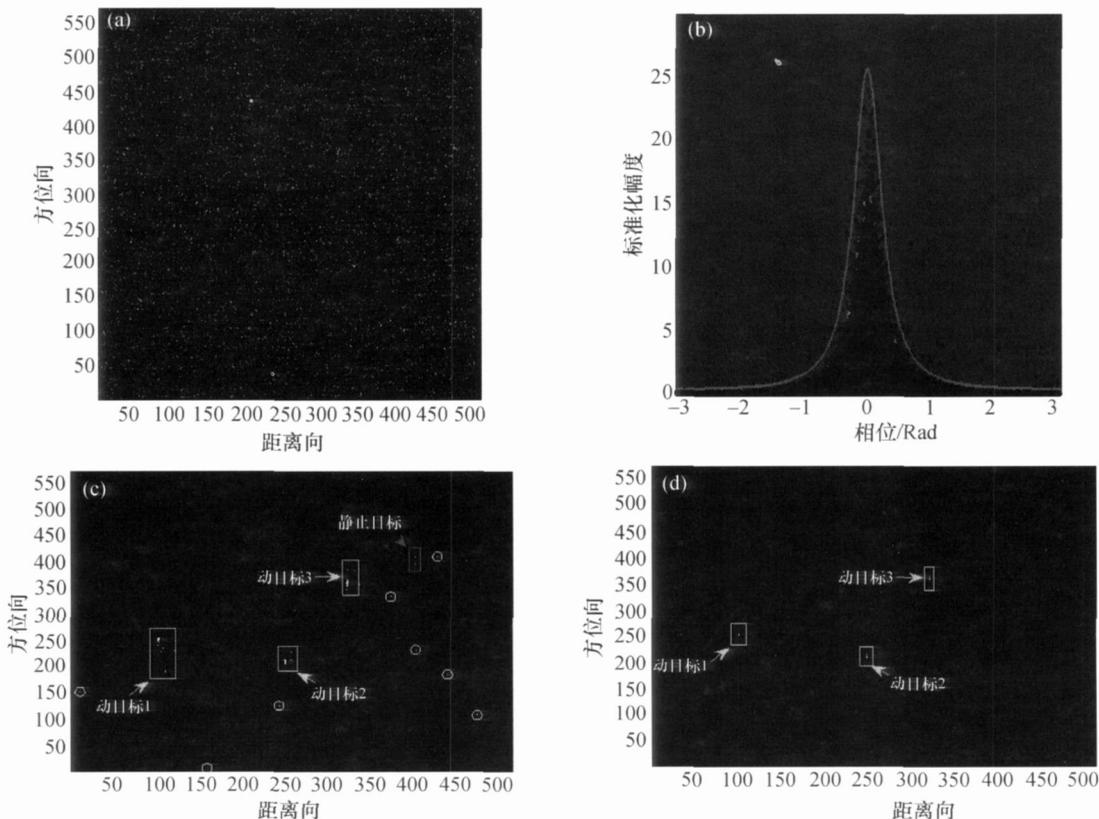


图 15 极度不均匀杂波环境下(单通道 SAR 图像幅度服从 G^0 分布)进行动目标检测的结果

(a) 仿真的极度不均匀区域的前向通道 SAR 图像; (b) 干涉复图像的 ATI 幅度—相位图和包络检测曲线; (c) 仅利用包络曲线进行检测的结果; (d) 经过 ATI 相位、幅度预滤波和包络曲线检测后的结果

保证目标 2 被检出, 则文献[11]的方法相应的检测门限要降低, 这样会造成虚警率的大幅提高, 相应的检测性能下降. 而文中的算法是基于 ATI 幅度和相位的联合信息进行检测, 虽然动目标的径向速度过小会导致 ATI 相位较小, 但此时 ATI 幅度会较大, ATI 干涉图中对应该目标的像素点仍分布在包络检测曲线之外, 动目标 2 自然会被检测出来, 说明所提动目标检测算法有效地扩展了最小可检测速度.

(3) 复杂杂波环境: 在乘积模型的框架下仿真了幅度服从 G^0 分布的强杂波, 其中各参数的估计值分别为: 形状参数 $\hat{\alpha}=5.0224$, 尺度参数 $\hat{\gamma}=4.015$, 扩展形状参数 $\hat{\delta}=2.0155$, 两通道的相关度 $\hat{\rho}=0.9593$. 把 3 个动目标和一个静止目标(参数设置同表 3)植入 G^0 杂波中(3 个动目标的 SCR 依次为 -0.44 , -0.42 和 -0.36 dB, 静止目标的 SCR 为 -0.25 dB, CNR 为 2.12 dB), 如图 15(a)所示, 由于强散射点众多, 此时已经无法目测动目标在图像中的位置. 应用所提算法在确定包络检测曲线后(如图 15(b)), 利用此包络曲线进行检测的结果如图 15(c)所示, 图中表明:

(i) 对于极度不均匀区域, 由于存在众多强散射点, 在图 15(b)中表现为 ATI 标准化幅度范围明显增大. 然而, 通过确定杂波 ATI 幅度-相位图的零相顶点, 以该顶点对应的极度不均匀区域联合分布的等高线作为包络检测曲线, 此包络检测曲线仍能精确地拟合杂波, 也就是说, 当利用此曲线进行动目标检测时绝大部分的杂波仍能有效地被滤除, 动目标的 ROI(region of interest)清晰地展现出来;

(ii) 为了去除相位发生漂移的杂波点(图 15(c)中方框内的杂波点)和噪声引起的杂波检测残留散点(图 15(c)中圆圈所注), 再经过 ATI 幅度、相位预滤波处理, 杂波被全部去除, 精确地检测出 3 个动目标, 如图 15(d)所示.

通过大量仿真验证表明, 对于不同均匀度的杂波都能够精确地检测出动目标, 检测算法具有很强的适应性.

6 结论

以构建检测率高、实用性强的 SAR 地面慢动目标检测过程为目标, 在理论层面上首先推导了均

匀区域、不均匀区域和极度不均匀区域的 ATI 干涉图幅度和相位的联合统计分布. 在算法层面上, 通过对联合分布的分析可以发现: 在分布的等高线图中总能够找到一条等高线能够精确拟合杂波的 ATI 幅度-相位图, 把此等高线作为包络检测门限, 对经过 ATI 幅度、相位预滤波处理的 ATI 干涉图进行检测, 最终实现了双通道 SAR 地面慢动目标的精确检测. 在此过程中, 给出了相关度参数的无偏估计方法, 且对影响检测性能的主要因素(如: 相位漂移、噪声等)作了原理上的分析和验证. 文中提出的检测方法 with 文献[10]和文献[11]中的方法相比, 具有以下优势:

(1) 扩展了最小可检测速度: 所提检测方法不但利用了独立的 ATI 幅度信息和 ATI 相位信息, 而且也充分考虑到两者的相关信息, 因而得到的包络检测门限能够精确地拟合杂波. 当动目标速度较小时, 其对应的 ATI 像素点也分布在检测曲线之外, 仍可有效检测;

(2) 可实现低对比度条件下动目标的检测(包含目标湮没于背景中的强杂波环境及目标一定程度的伪装等情况): 当杂波的幅度与动目标处于同一数量级甚至强于动目标时, 所提检测方法能够有效地屏蔽相位漂移的影响, 不用经过 ATI 幅度、相位预处理便可准确地检测出动目标的 ROI, 大大提高了动目标的检测性能;

(3) 对不同杂波环境的适应性: 不论是均匀区域还是不均匀区域, 甚至极度不均匀区域, 所提检测方法都能快速地找到包络检测曲线, 准确地拟合杂波, 以高的检测率、低的虚警率实现地面慢动目标的检测.

附录 1

$E(W)$ 的求解: 根据(8)式得到

$$E(W) = \frac{\gamma^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^\infty t^{\alpha-2} \exp(-\gamma t) dt \quad (23)$$

根据参考文献[21], (23)式的积分结果为: $E(W) = \gamma(\alpha-1)$, $\gamma > 0$, $\alpha > 1$.

附录 2

$E(I_n)$ 的求解: ATI 干涉图 I_n 的一阶矩为

$$E(I_n) = \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \xi e^{j\psi} p(\xi, \psi) d\psi d\xi = \int_0^\infty \frac{2n^{n+1} \xi^{n+1}}{\Gamma(n)(1-\rho^2)} K_{n-1} \left(\frac{2n\xi}{1-\rho^2} \right) \left[\int_{-\pi}^\pi e^{j\psi} \exp \left(\frac{2n\xi \cos \psi}{1-\rho^2} \right) d\psi \right] d\xi \quad (24)$$

令: $V = \int_{-\pi}^\pi e^{j\psi} \exp \left(\frac{2n\xi \cos \psi}{1-\rho^2} \right) d\psi$ 根据奇、偶函数的积分规则, 奇函数在对称区间上的定积分值为零, 可简化为

$$V = \int_{-\pi}^\pi (\cos \psi + j \sin \psi) \exp \left(\frac{2n\xi \cos \psi}{1-\rho^2} \right) d\psi = \int_{-\pi}^\pi \cos \psi \exp \left(\frac{2n\xi \cos \psi}{1-\rho^2} \right) d\psi \quad (25)$$

根据参考文献[21], 得到 $V = j2\pi J_1 \left(-j \frac{2n\xi}{1-\rho^2} \right)$, 代入(24)式中得到

$$E(I_n) = \frac{j4n^{n+1}}{\Gamma(n)(1-\rho^2)} \int_0^\infty \xi^{n+1} K_{n-1} \left(\frac{2n\xi}{1-\rho^2} \right) J_1 \left(-j \frac{2n\xi}{1-\rho^2} \right) d\xi \quad (26)$$

根据参考文献[21], (26)式可积分为

$$E(I_n) = \rho(1-\rho^2)^{n+1} {}_2F_1(n+1, 2; 2; \rho^2) \quad (27)$$

再根据 ${}_2F_1(n+1, m; m; z) = (1-z)^{-(n+1)}$, 从而最终得到 I_n 的一阶矩为

$$E(I_n) = \rho \quad (28)$$

参 考 文 献

- 1 Moreira JR, Keydel W. A new MTFSAR approach using the reflectivity displacement method. *IEEE Trans on GRS*, 1995, 33(5): 1238-1244
- 2 Fienup JR. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing. *IEEE Trans on AES*, 2001, 37(3): 794-809
- 3 李景文. 合成孔径雷达动目标检测与成像. 北京航空航天大学博士学位论文, 北京, 1999
- 4 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究. 中国科学院电子学研究所博士学位论文, 北京, 2003
- 5 Entzminger JN. JointSTARS and GMTI: Past, present and future. *IEEE Trans on AES*, 1999, 35(2): 748-761
- 6 Whelan DA. Discoverer II program summary. *IEEE International Radar Conference*, 2002; 7-8
- 7 Steyskal H, Schindler JK, Franchi P, et al. Pattern synthesis for TechSat21-a distributed space-based radar system. *IEEE An-*

- tennas and Propagation Magazine 2003, 45(4): 19-25
- 8 Livingstone C, Sikaneta I, Gierull CH, et al. An airborne SAR experiment to support RADA RSAT-2 GMTI. *Can J Remote Sens*, 2002, 28(6): 1-20
- 9 Livingstone C, Thompson A. The moving object detection experiment on RADARSA T-2. *Can J Remote Sens*, 2004, 30(3): 355-368
- 10 Chiu S. Computer simulation of Canada's DADA RSA T-2 GMTI. *RTO SET Symposium, Greece*, 2000, 451-458
- 11 Gierull CH. Statistical analysis of multilook SAR interferograms for CFAR detection of ground moving targets. *IEEE Trans on GRS*, 2004, 42(4): 691-701
- 12 高飞, 毛士艺, 玉振明, 等. 一种全自动的检测方法用于 SAR-ATI 的 GMTI. *航空学报*, 2005, 26(1): 84-88
- 13 Frey AC, Muller HJ, Yanasse CF, et al. A model for extremely heterogeneous clutter. *IEEE Trans on GRS*, 1997, 35(3): 648-659
- 14 Arseault H. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed. *J Opt Soc Am*, 1976, 66(11): 1160-1163
- 15 Ward KD. Compound representation of high resolution sea clutter. *Electron Lett*, 1981, 7: 561-565
- 16 Jakeman E. A model for non-rayleigh sea echo. *IEEE Trans on Antennas Propagat*, 1976, 24(6): 806-814
- 17 Goodman NR. Statistical analysis based on a certain multivariate complex gaussian distribution (an introduction). *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, 34(1): 152-177
- 18 Lee JS, Miller AR, Hoppel KW. Statistics of phase difference product magnitude of multi-look processed gaussian signals. *Waves in Random Media*, 1994, 4: 307-319
- 19 Lee JS, Hoppel KW, Mango SA, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Trans on GRS*, 1994, 32(5): 1017-1028
- 20 Joughin IR, Winebrenner DP, Percival DB. Probability density functions for multilook polarimetric signatures. *IEEE Trans on GRS*, 1994, 32(3): 562-574
- 21 金玉明, 薛兴恒, 顾新身, 等. 实用积分表. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006, 295-350
- 22 Touzi R, Lopes A, Bruniquel J, et al. Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Trans on GRS*, 1999, 37(1): 135-149
- 23 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
- 24 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001, 204-205
- 25 高贵. SAR 图像目标 ROI 自动获取技术研究. 国防科技大学博士学位论文, 长沙, 2007