

子带子孔径 ATI 地面运动目标检测及参数估计方法

周红 黄晓涛 常玉林 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文提出了一种新的基于子带子孔径图像序列的顺轨干涉(ATI)地面运动目标检测方法。该方法利用超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)的大带宽大波束角和低频特性,生成了对应不同中心频率和视角的多幅子带子孔径顺轨干涉图,并联合运动目标的多频多子孔径干涉相位进行地面运动目标检测和参数估计。该方法相比传统的 ATI 方法的优点在于:在检测方面,消除了盲速,既能检测具有距离向速度的目标,又能检测具有方位向速度的目标;在速度估计方面,能无模糊地同时估计出目标的距离向速度和方位向速度。基于 UWB SAR 半实测回波的实验验证了该方法的有效性。

关键词: UWB SAR; 地面运动目标指示; 顺轨干涉; 子带; 子孔径

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0062-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01561

A Ground Moving Target Detection and Parameter Estimation Method Using Subband and Subaperture Along Track Interferometry

Zhou Hong Huang Xiao-tao Chang Yu-lin Zhou Zhi-min

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A method of ground moving target detection based on subband and subaperture ATI image series is proposed. It exploits the wideband, large beamwidth and low frequency characteristics of UWB SAR to generate a series of subband and subaperture ATI images. These images corresponding to different centre frequencies and angle-views are combined to detect a moving target and estimate its parameters. The proposed method in the paper has improvements over traditional ATI method. For detection, it removes blind velocity and can detect the moving target not only with range velocity, but also with azimuth velocity. Besides, it can estimate the unwrapped range velocity and azimuth velocity as well. The experiment based on UWB SAR half-real echo validates the method.

Key words: UWB SAR; Ground Moving Target Indication (GMTI); Along Track Interferometry (ATI); Subband; Subaperture

1 引言

利用机载多通道超宽带合成孔径雷达(Ultra-Wide Band Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)系统实现地面运动目标指示(Ground Moving Target Indication, GMTI)功能,可以对较大范围的开阔平坦或叶簇覆盖地区的静止和运动目标进行侦察、监视及成像。在目前的 SAR/GMTI 方法中,顺轨干涉(Along Track Interferometry, ATI)^[1]技术以 SAR 成像作为预处理手段,能获得较长的相干处理时间,对慢速运动目标的检测能力较强,近年来受到广泛关注^[2-4]。

传统的 ATI 方法均针对双通道全带宽全孔径 SAR 图像进行,在正侧视 SAR 顺轨干涉图中,运动目标的相位 $\Delta\phi$ 是由距离向速度 v_y 决定的干涉相位在 $[-\pi, \pi]$ 范围的主值:

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi f_c v_y \sin\varphi}{c v_a} B - 2\pi k, \quad -\pi \leq \Delta\phi \leq \pi, k \text{ 为整数} \quad (1)$$

式(1)中 c, f_c, φ, v_a, B 分别表示电磁波传播速度,信号载频,天线入射角,载机速度和基线长度。因此,传统双通道 ATI 存在两方面不足:

(1)当两通道天线的间距大于半波长时,即使 v_y 不为零,对应的 $\Delta\phi$ 也可能为零,检测目标时产生盲速现象;不同 v_y 对应的 $\Delta\phi$ 可能相同,估计运动目标参数时产生速度模糊;

(2)只能检测距离向速度不为零的运动目标,并且只能估计目标的距离向速度。

传统 ATI 的盲速和速度模糊通常采用多基线(至少 4 部天线)或多频方式解决^[5,6], RadarSat-2 系统提出了多触发的天线工作模式^[7]。UWB SAR 波长较长,要求较长的基线,受天线尺寸和平台大小的限制,在载机上装置多部接收天线并形成有效基

2008-11-26 收到, 2009-07-14 改回

教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0223)资助课题

通信作者: 周红 hongzhou118@yahoo.com.cn

线非常困难, 而多频或者多触发方案增加了系统的复杂性。对于传统 ATI 的第(2)个不足之处, 尚无文献对其研究。

本文提出了一种子带子孔径 ATI 方法, 在不增加系统复杂性的前提下, 利用了 UWB SAR 系统的大带宽和大波束角特性, 生成指示了不同中心频率和视角的子带子孔径干涉图, 并将其联合进行运动目标检测和参数估计。在检测方面, 消除了盲速, 既能检测具有距离向速度的目标, 又能检测具有方位向速度的目标; 在速度估计方面, 能够无模糊地同时估计出目标的距离向速度和方位向速度。

2 运动目标在子带子孔径图像上的表征和干涉相位

本节推导运动目标的成像位置和干涉相位, 以此作为区分动静目标、估计目标参数的依据。

2.1 运动目标在子带子孔径图像上的表征

设条带 SAR 场景中, 载机沿方位向以速度 v_a 运动, 高度是 h , 零时刻第 $l(l=1,2,3)$ 部天线的方位位置为 $x_a+(l-1)d$, 此时刻一个点目标在地面上的方位和地距坐标是 (x_T, y_T) , 具有恒定的地面速度 (v_x, v_y) , 天线为单发单收(单发多收或者多发多收可等效为单发单收)。令系统载频为 f_c , 则载频波数 $k_c = 4f_c/c$ 。将各通道 UWB SAR 图像在波数域 (k_x-k_r) 进行划分(如图 1 阴影所示), 得到中心频率为 $f_{cm}(m=1, 2, \dots, M)$, 视角为 $\theta_m (m=1, 2, \dots, N)$, 带宽和积累角分别为 Δf 和 $\Delta\theta_n$ 的子带子孔径图像 $S_{mn}^{(l)}$ 。其支撑域为

$$\left. \begin{aligned} \left| \sqrt{k_x^2 + (k_r + k_c)^2} - \frac{4\pi f_{cm}}{c} \right| &\leq \frac{4\pi \cdot \Delta f}{c} \\ \tan\left(\theta_n - \frac{\Delta\theta_n}{2}\right) &\leq \frac{k_x}{k_r + k_c} \leq \tan\left(\theta_n + \frac{\Delta\theta_n}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

定义 V , X 和 R :

$$V = \sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2} \quad (3)$$

$$X = \frac{(x_T - x_a)(v_a - v_x) - y_T v_y}{V} \quad (4)$$

$$R = \sqrt{h^2 + \left[\frac{y_T(v_a - v_x) + (x_T - x_a)v_y}{V} \right]^2} \quad (5)$$

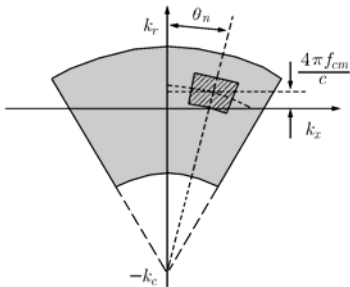


图 1 子带子孔径图像的波数支撑域

当 $V \approx v_a$, 子孔径图像对应的相干积累时间较短时, 以时间差 $(l-1)B/v_a$ 配准后, 运动目标在第 l 个通道的子带子孔径图像 $S_{mn}^{(l)}$ 上可视为聚焦, 聚焦像位于 $(X_n^{(l)}, R_n^{(l)})$ 处^[8]:

$$\begin{aligned} X_n^{(l)} &= x_n^{(l)}(1 - (V/v_a)^2) + V/v_a[X + (l-1) \\ &\quad \cdot B(V/v_a - \cos \alpha)] \\ R_n^{(l)} &= \{h^2 + [Y - (l-1)B \sin \alpha]^2 \\ &\quad + (V/v_a)^2(1 - (V/v_a)^2)(x_n^{(l)} - Xv_a/V)^2\}^{1/2} \\ &\approx [R - (l-1)B \sin \phi \\ &\quad \cdot v_y/v_a] \sqrt{1 + (V/v_a)^2(1 - (V/v_a)^2) \tan^2 \theta_n} \quad (6) \end{aligned}$$

其中 α 满足 $\cos \alpha = (v_a - v_x)/V$; ϕ 是下视角; $x_n^{(l)}$ 是子孔径中心的时域位置, 它与 θ_n 有关: $x_n^{(l)} = Xv_a/V - [R - (l-1)d \sin \phi \cdot v_y/v_a] \tan \theta_n$ 。

设目标聚焦像的峰值在距 $(X_n^{(l)}, R_n^{(l)})$ 最近的采样点 $(X_n^{(l)} + \Delta X_n^{(l)}, R_n^{(l)} + \Delta R_n^{(l)})$ 处取得。由于不同通道的 $(X_n^{(l)}, R_n^{(l)})$ 差别很小, 因此目标在不同通道第 n 幅子孔径图像上的聚焦像峰值点的位置相同。根据后向投影成像算法, 目标在该点的复值等于脉冲压缩后的子带信号 $s_m^{(l)}(\hat{t}, t)$ 沿距离迁徙曲线在第 n 个子孔径内的积分:

$$\begin{aligned} S_{mn}^{(l)}(X_n^{(l)} + \Delta X_n^{(l)}, R_n^{(l)} + \Delta R_n^{(l)}) \\ \approx \frac{1}{T} \int_{\frac{x_n^{(l)} - T}{v_a}}^{\frac{x_n^{(l)} + T}{v_a}} s_m^{(l)} \left(\frac{2}{c} \{ (R_n^{(l)} + \Delta R_n^{(l)})^2 \right. \\ \left. + (v_a t_m - X_n^{(l)} - \Delta X_n^{(l)})^2 \}^{1/2}, t \right) \\ \cdot \exp \left[j \frac{4\pi f_{cm}}{c} \{ (R_n^{(l)} + \Delta R_n^{(l)})^2 \right. \\ \left. + (v_a t_m - X_n^{(l)} - \Delta X_n^{(l)})^2 \}^{1/2} \right] dt \\ \approx \text{sinc} \left(\frac{2\Delta f \Delta R_n^{(l)}}{c} \right) \text{sinc} \left(\frac{2f_{cm}}{c} \frac{\Delta X_n^{(l)} v_a T}{r^{(l)}(t_n)} \right) \\ \cdot \exp \left[j \frac{4\pi f_{cm}}{c} \frac{R_n^{(l)}}{r^{(l)}(t_n)} \Delta R_n^{(l)} \right. \\ \left. - j \frac{4\pi f_{cm}}{c} \frac{v_a t_m - X_n^{(l)}}{r^{(l)}(t_n)} \Delta X_n^{(l)} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

其中 $r^{(l)}(t) = \sqrt{(R_n^{(l)})^2 + (v_a t - X_n^{(l)})^2}$ 。 t_n 满足 $\cos \theta_n \approx R_n^{(l)}/r^{(l)}(t_n)$ 。记式(7)的相位为 $\phi_{mn}^{(l)}$, 从而得到运动目标在第 l 个通道、中心频率为 f_{cm} 、视角为 θ_n 的子带子孔径图像上的表征:

$$\begin{aligned} S_{mn}^{(l)}(x, r) &\approx \text{sinc} \left[\frac{2\Delta f}{c} (r - R_n^{(l)}) \right] \\ &\quad \cdot \text{sinc} \left[\frac{2f_{cm}}{c} \frac{v_a T}{r^{(l)}(t_n)} (x - X_n^{(l)}) \right] \cdot \exp(j\phi_{mn}^{(l)}) \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)同样适用于静止目标的情形,此时 $V=v_a$, 在不同通道的图像上静止目标的表征相同。

2.2 DPCA 抑制杂波后,运动目标在子带子孔径干涉图上的相位

当通道特性、天线方向图一致时,相位中心天线偏置(Displaced Phase Centre Antenna, DPCA)具有很好的杂波抑制效果。将 1、2 通道, 2、3 通道的各幅子带子孔径图像通过 DPCA 处理再进行 ATI 得到一组经过杂波抑制的子带子孔径干涉图

$$I_{mn}(x, r) = [S_{mn}^{(2)}(x, r) - S_{mn}^{(1)}(x, r)] \cdot [S_{mn}^{(3)}(x, r) - S_{mn}^{(2)}(x, r)]^* = 2 |S_{mn}^{(2)}(x, r)|^2 \cdot (1 - \cos \Delta \phi_{mn}) \cdot \exp[j \Delta \phi_{mn}] \quad (9)$$

此时对于静止目标有 $I_{mn}(x, r) = 0$ 。定义径向速度为 v_n , 它是目标速度矢量在 θ_n 方向的投影。

$$v_n = v_y \sin \varphi \cdot \cos \theta_n + v_x \cdot \sin \theta_n \quad (10)$$

记缠绕周期为 k_{mn} , 相位噪声是 ω_{mn} , 则式(9)中的 $\Delta \phi_{mn}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{mn} &= \phi_{mn}^{(1)} - \phi_{mn}^{(2)} - 2\pi k_{mn} \\ &= -\frac{4\pi f_{cm}}{c} \frac{B}{v_a} \left[\frac{v_y}{V} B \sin \varphi \cdot \cos \theta_n - \gamma(\gamma - \cos \alpha) B \cdot \sin \theta_n \right] - 2\pi k_{mn} + \omega_{mn} \\ &\approx -\frac{4\pi f_{cm}}{c} \frac{B}{v_a} v_n - 2\pi k_{mn} + \omega_{mn} \end{aligned} \quad (11)$$

特别地,当 $\theta_n=0$, 并且没有相位噪声时,得到与传统全孔径 ATI 方法一致的结论(见式(1))。

以上讨论的是速度较慢、目标能够近似为聚焦的情形。文献[9]对散焦目标顺轨干涉相位进行了分析,其结论适用于子带子孔径干涉图:当目标速度较大、散焦明显时,它的成像轨迹的中心位置仍满足式(6),在成像轨迹上的顺轨干涉相位的中值与聚焦像的顺轨干涉相位(式(11))相同。因此可提取干涉

相位中值作为散焦目标的干涉相位。

3 子带子孔径 ATI 方法的原理

由式(10)和式(11)可得规律如下:

(1)关于成像位置:运动目标的成像位置随 θ_n 连续变化,而与 f_{cm} 无关。

(2)关于干涉像幅度:当运动目标的 RCS 随 θ_n 和 f_{cm} 变化很小时,它的像的幅度在各幅子带子孔径干涉图中可视为不变。

(3)关于干涉相位:运动目标去缠绕的干涉相位是 θ_n 的连续函数,因此去缠绕的径向速度也是 θ_n 的连续函数。采用与第 4 节相同的系统参数,仿真了两个点目标的回波(添加了 -10 dB 的高斯分布白噪声),按第 2 节子带子孔径干涉图的生成流程,得到了目标在不同视角、中心频率条件下的干涉相位并绘在图 2 中,所得结果与式(11)吻合。图 2 (a)中目标的速度为(3, 17) m/s, 图 2 (b)为(2, -14) m/s。

本文基于以上规律,提出子带子孔径 ATI 方法,基本原理如下:

(1)联合检测:利用运动目标在多幅子带子孔径干涉图上的相位进行联合检测,相比单幅图检测能降低虚警概率。利用规律(1)和规律(2)可将某运动目标在视角相邻的干涉图中的位置关联起来,这使运动目标的干涉相位序列能被提取出来,保证了联合检测的实现。

(2)多子带解速度缠绕:观察式(11)可知,视角固定时径向速度不变,此时干涉相位的变化仅与中心频率有关,因此综合多子带干涉相位可以提高盲速和解径向速度的模糊。

(3)多子孔径解速度耦合:由不同视角的去模糊的径向速度可以解速度耦合,从而估计出目标的距离向速度和方位向速度。

由此得到子带子孔径 ATI 方法的实现流程(如图 3 所示)。

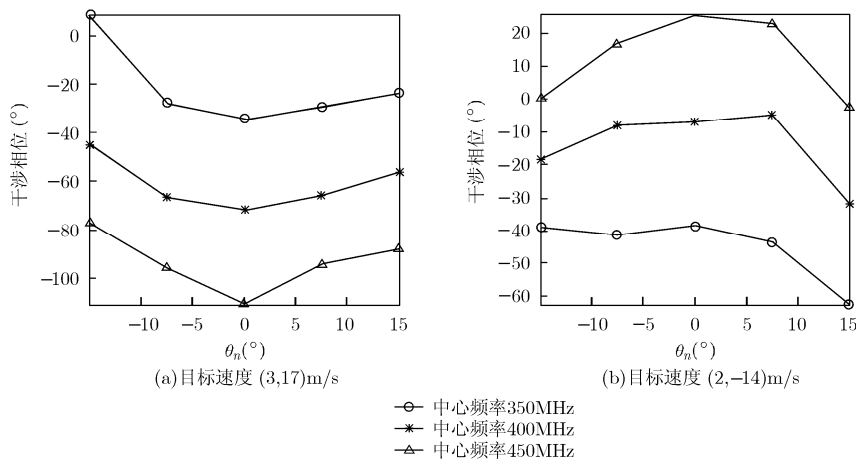


图2 两个运动目标的子带子孔径干涉相位

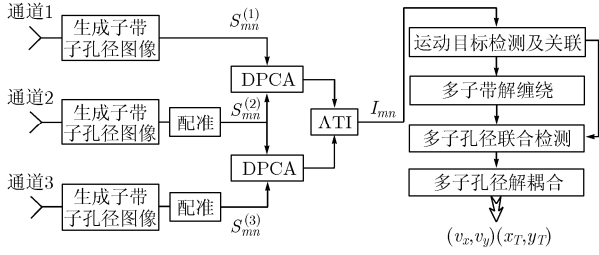


图 3 3 通道子带子孔径 ATI 方法实现流程

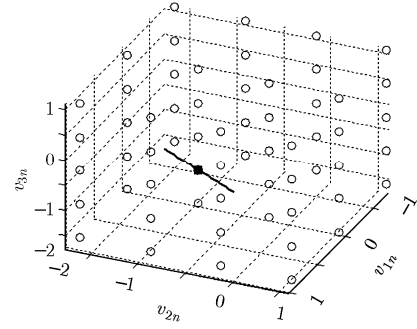


图 4 由投影立方图解速度缠绕

3.1 结合多子带解缠绕的多子孔径联合检测

为减少联合检测的运算量，以单幅干涉图粗门限检测的结果作为联合检测的待判决目标；再结合多子带解速度缠绕步骤，设置多子孔径联合检测判决准则。由此得到运动目标联合检测步骤：

步骤1 在各幅子带子孔径干涉图中设置幅度和相位门限检测出运动目标^[1]。

步骤2 根据规律(1)和规律(2)，将不同子带子孔径干涉图上同一目标的相位关联。

步骤3 由视角相同但中心频率不同的缠绕的干涉相位 $\Delta\phi_{1n}, \Delta\phi_{2n}, \dots, \Delta\phi_{Mn}$ 解缠绕得到真实的径向速度 v_n 。

步骤4 对于 Step1 检测出的运动目标，提取它的不同视角的径向速度 v_n ，根据 v_n 是否是 θ_n 的连续函数再次判决。

3.2 多子带解速度缠绕

由式(11)知解缠绕的关键在于求缠绕周期的值。文献[10]运用了投影定理噪声环境下的多基线 InSAR 相位缠绕，本文将其运用于子带干涉相位解缠绕：首先为 v_n 建立估计模型：

$$\hat{v}_n = -\frac{cv_a}{4\pi f_{cm} B \sin \varphi} (\Delta\phi_{mn} + 2\pi k_{mn}), \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad n \text{ 为固定值} \quad (12)$$

投影定理通过求一组 $k_{mn} (m=1, 2, \dots, M)$ ，使估计的一组 $\hat{v}_n(k_{mn})$ 方差最小，从而估计真实径向速度。对于子带是 3 个以下的情形，可通过绘制投影立方图直观求得缠绕周期。例如，采用第 4 节实验中的系统参数，取子带中心频率为 [350, 400, 450] MHz，各子带带宽为 50 MHz，设置仿真目标的径向速度 $v_n=8.91$ m/s，添加标准差为 5° 的高斯分布的相位噪声，观测到被噪声污染的缠绕相位为 $[-168.7^\circ, 167.9^\circ, 140.5^\circ]$ 。为求缠绕周期，绘制投影立方图如图 4 所示，在实心圆圈处可直观得到 $[k_{1n}, k_{2n}, k_{3n}]=[0, -1, -1]$ ，由此估计径向速度 $\hat{v}_n=9.07$ m/s。子带数目超过 3 个时，类似地在超平面中计算缠绕周期。选择一组合适的中心频率能极大提高盲速，这个盲速一般大于常见的地面运动目标的速度 (<30

m/s)，此时可认为消除了盲速。

3.3 多子孔径解速度耦合

由式(10)知径向速度随子孔径视角变化，因此在联合检测后，综合多个视角的径向速度可以估计出目标的 2 维速度。为此建立关于 v_x, v_y 的观测模型：

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_1 & \sin \varphi \cos \theta_1 \\ \sin \theta_2 & \sin \varphi \cos \theta_2 \\ \vdots & \vdots \\ \sin \theta_N & \sin \varphi \cos \theta_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix} \quad (13)$$

利用线性最小二乘求解得到：

$$\hat{v}_x = \frac{2 \sum_{i=1}^N v_i \cdot \left[\sin \theta_i \left(N + \sum_{n=1}^N \cos 2\theta_n \right) - \cos \theta_i \sum_{n=1}^N \sin 2\theta_n \right]}{N^2 - N - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \cos(2\theta_i - 2\theta_j)}$$

$$\hat{v}_y = \frac{2 \sum_{i=1}^N v_i \cdot \left[\cos \theta_i \left(N - \sum_{n=1}^N \cos 2\theta_n \right) - \sin \theta_i \sum_{n=1}^N \sin 2\theta_n \right]}{N^2 - N - 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \cos(2\theta_i - 2\theta_j)} \quad (14)$$

求得速度参数后，结合各子孔径成像位置，不难求得运动目标的位置参数 (x_T, y_T) 。

3.4 速度估计误差分析

在单幅干涉图中检测运动目标的性能分析及解决见文献[11-13]。这里主要讨论目标速度估计误差与子带子孔径个数的关系。运动目标速度估计的误差来源于单幅子带子孔径干涉图中的相位噪声。利用单幅图中相位噪声的方差与信噪比(SNR)(记为 a) 的关系计算出 v_x, v_y 的方差均随 SNR、 N 和 M 单调递减。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{v_x}^2 &= \frac{a + 0.5 \left(\frac{cv_a}{4\pi af_c B} \right)^2}{M} \cdot \frac{2N+2 \sum_{n=1}^K \cos 2\theta_n}{N^2 - N - 2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=n+1}^N \cos(2\theta_n - 2\theta_j)} \\ \sigma_{v_y}^2 &= \frac{a + 0.5 \left(\frac{cv_a}{4\pi af_c B} \right)^2}{M} \cdot \frac{2K - 2 \sum_{k=1}^N \cos 2\theta_k}{N^2 - N - 2 \sum_{k=1}^N \sum_{j=n+1}^N \cos(2\theta_n - 2\theta_j)} \end{aligned} \right\} (15)$$

由式(15)可知, 当子带带宽和子孔径积累角保持不变即子带子孔径干涉图 SNR 固定时, 增加子带个数和子孔径个数能提高目标速度估计的精度, 但同时增大了运算量。

4 实验

4.1 方法实现

本文选择了一段单通道 P 波段 UWB SAR 实测数据, 以抽样的方式生成 3 通道静止杂波, 再叠加仿真的 3 通道运动目标回波及高斯分布的噪声, 由此生成包含静止杂波信号、噪声和运动目标信号的 3 通道回波数据即半实测回波数据, SNR 为 15 dB, 系统参数如表 1 所列。

表 1 UWB SAR 多通道系统参数

参数	取值
信号脉宽	10 μ s
基线	2.392 m
平台速度	104 m/s
脉冲重复频率	333 Hz
载机高度	5400 m
主波束角	35°

下面给出子带子孔径 ATI 方法的实验结果。设定了 3 个子带, 5 个子孔径, 子带带宽均为 80 MHz, 子带中心频率分别为 [350, 400, 450] MHz, 子孔径视角分别为 [0°, $\pm 4.5^\circ$, $\pm 9^\circ$], 子孔径图像方位分辨率为 2 m。生成了 45 幅子带子孔径图像, 其中选择通道 1, 400 MHz 中心频率的 5 个视角子孔径图像显示在图 5 中。基于多幅子带子孔径图像进行多通道 DPCA 和 ATI, 可得多频多子带干涉相位图, 其中 400 MHz 对应的不同视角干涉图(放大了有目标的区域)显示在图 6 中, 运动目标的速度估计结果如表 2 所列, 表 2 还列出了各目标在哪些中心频率或视角的干涉图中出现盲速或速度缠绕现象。

4.2 方法性能

在 4.1 实验条件下, 改变子带个数、子孔径个数, 多次实验 Monte Carlo 仿真以统计目标 2 的距离向速度和方位向速度估计的误差。其中相邻子带中心频率差取为 40 MHz, 相邻子孔径视角差取为 4°; 相邻子带带宽的重叠率以及相邻子孔径积累角的重叠率都小于 50%。表 3 中列出了统计结果, 与式(15)的规律比较符合。

5 结论

针对 UWB SAR 系统的大波束角、大带宽和低载频特性, 本文提出 3 通道子带子孔径 ATI 方法, 利用运动目标成像位置和干涉相位随视角和中心频率变化的规律, 在子带子孔径顺轨干涉图序列中对运动目标进行检测和估计参数。基于半实测回波数据的实验证明: 子带子孔径 ATI 方法在检测方面消除了盲速, 能检测具有距离向速度和方位向速度的运动目标; 在估计方面解除了速度模糊和耦合, 能估计出目标的距离向速度和方位向速度。

表 2 目标参数设置及估计结果

目标	方位向速度(m/s)			距离向速度(m/s)			盲速现象	速度缠绕现象
	真实值	估计值	误差	真实值	估计值	误差		
1	-3.00	-3.21	0.21	6.00	6.04	0.04	无	无
2	-2.00	-1.69	0.31	-9.40	-9.32	0.08	$f_{c2}, -9^\circ$	f_{c2}, f_{c3}
3	2.00	2.03	0.03	16.00	15.78	0.22	$f_{c3}, 4.5^\circ$	f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}
4	0.00	-0.05	0.05	-20.0	-18.85	0.15	无	f_{c1}, f_{c2}, f_{c3}

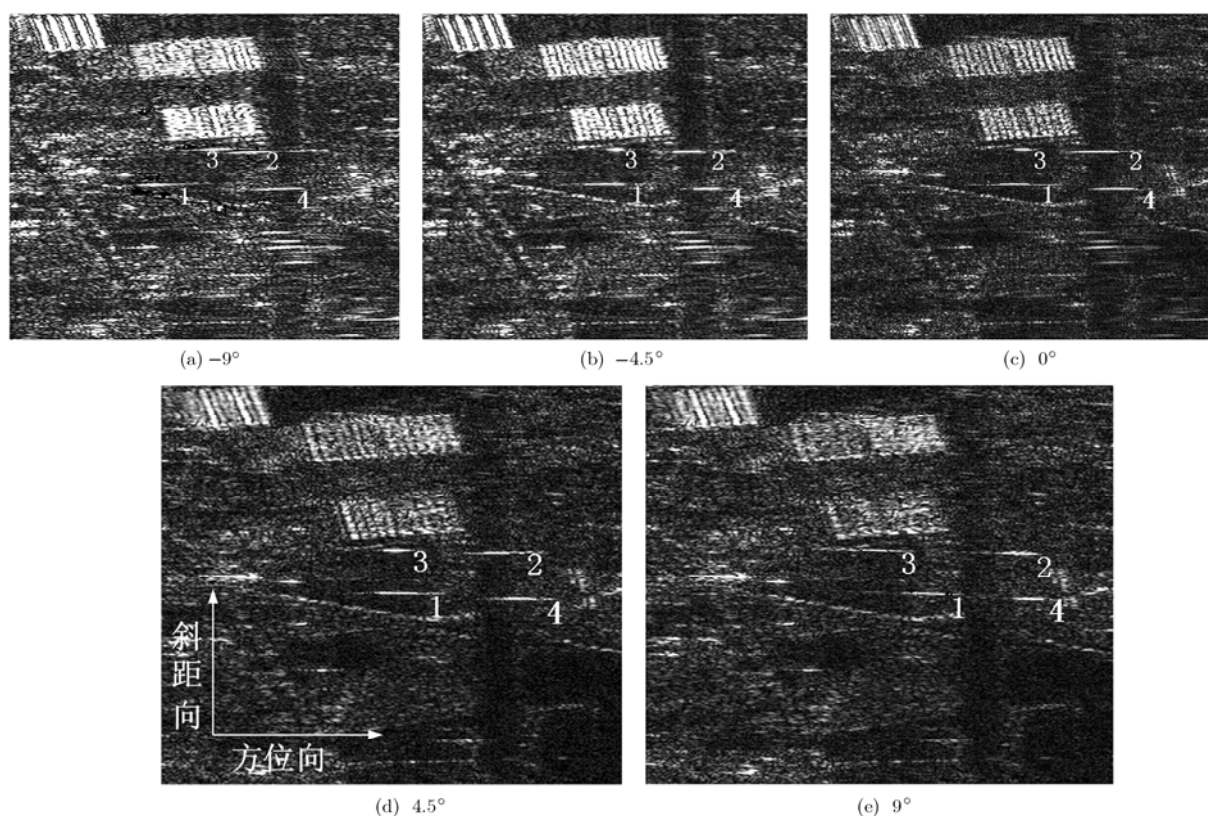


图 5 通道 1 $f_c=400.0$ MHz 时各视角的子带子孔径图像(范围: 斜距向 12782.0~13781.0 m, 方位向 615.0~1094.0 m)

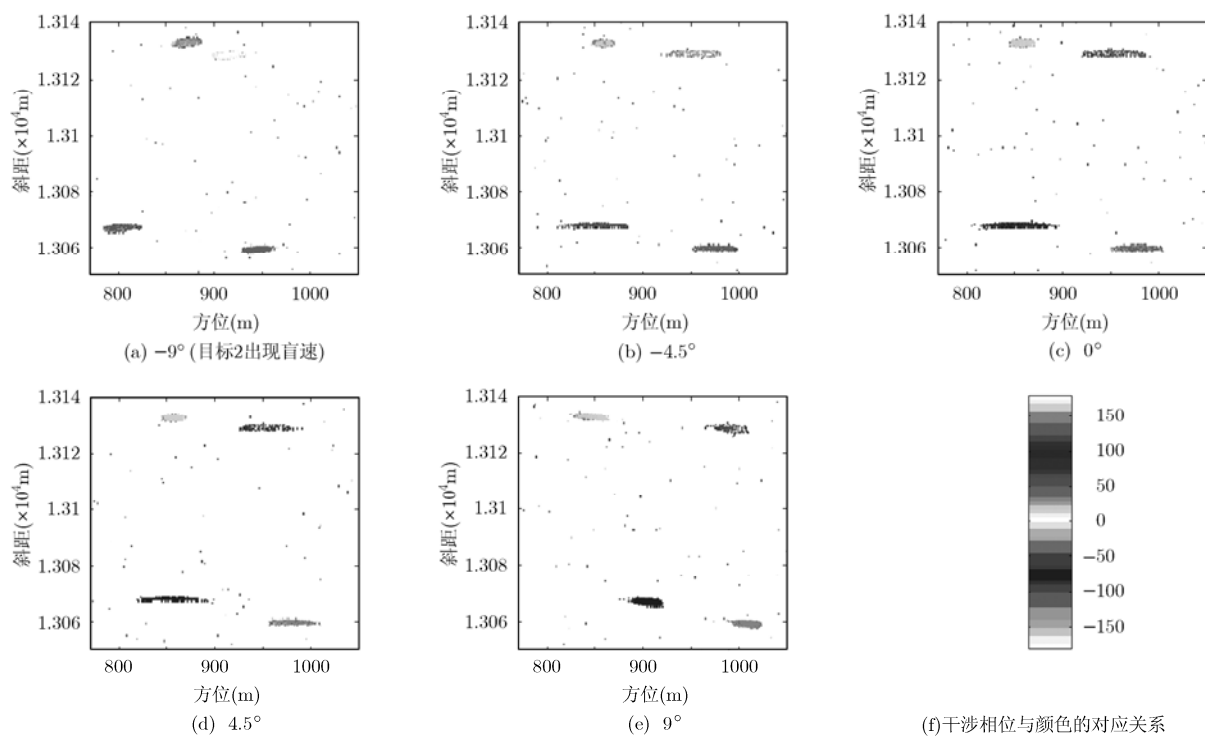


图 6 $f_c=400.0$ MHz 时各视角的子带子孔径干涉图

表 3 目标 2 速度估计误差统计结果

SNR(dB)	速度的标准差(m/s)	N=5			M=3		
		M=3	M=4	M=5	N=4	N=5	N=6
10	v_x	0.150	0.112	0.090	0.211	0.150	0.113
	v_y	0.130	0.097	0.078	0.145	0.130	0.119
15	v_x	0.083	0.062	0.050	0.117	0.083	0.063
	v_y	0.072	0.054	0.043	0.080	0.072	0.066
20	v_x	0.046	0.035	0.028	0.065	0.046	0.035
	v_y	0.040	0.030	0.024	0.045	0.040	0.037

参 考 文 献

- [1] Zhang Yu-hong. Along Track Interferometry Synthetic Aperture Radar (ATI-SAR) techniques for ground moving target detection. Air Force Research Laboratory, New York, January 2006.
- [2] Kapfer R and Davis M E. Along track interferometry for foliage penetration moving target indication. Proceedings of IEEE 2008 Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 321-326.
- [3] Chapin Elaine and Chen C W. Along-track interferometry for ground moving target indication. IEEE A&E Systems Magazine, Phoenecix, AZ, USA, 2008, 23: 19-24.
- [4] Fischer J, Baumgartner S, and Reigber A, *et al.* Geometric, radiometric, polarimetric and along-track interferometric calibration of the new F-SAR system of DLR in X-band. Proceedings of 7th European Conference on SAR, Friedrichshafen, Germany, 2008, 3: 109-112.
- [5] Wu Xin-wei and Zhang C. A new method of resolving velocity ambiguities in multi-channel interferometric SARGMTI. 2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, 2006: 1-4.
- [6] Budillon A, Pascazio V, and Schirinzi G. Estimation of radial velocity of moving targets by along-track interferometric SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 349-353.
- [7] Gabele M and Sikaneta I. A new method to create a virtual third antenna from a two-channel SAR GMTI system. 2007 Waveform Diversity & Design, Pisa, Italy, 2007: 433-437.
- [8] Zhou Hong, Huang Xiao-tao, Chang Yu-lin, and Zhou Zhi-min. Single-channel UWB SAR ground moving targets detection method using change detection based on single-pass sub-aperture images. 2007 1st Asian and Pacific Conference on SAR, Huangshan, 2007: 266-270.
- [9] 常玉林, 黄晓涛, 周红, 周智敏. 基于 ATI 的双通道 UWB SAR 运动目标检测和距离向速度估计. 信号处理, 2008, 24(5): 742-746.
- Chang Yu-lin, Huang Xiao-tao, Zhou Hong, and Zhou Zhi-min. Moving target detection and velocity estimation via along track interferometry using two-channel UWB SAR. *Signal Processing*, 2008, 24(5): 742-746.
- [10] Andres C, Scheiber R, Bachmann M, Gonzalez J H, and Krieger G. Phase unwrapping for multiple interferograms: an airborne experiment for TanDEM-X. Proceedings of 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008, 3: 281-284.
- [11] Chen C W. Performance assessment of along-track interferometry for detecting ground moving targets, IEEE International Radar Conference 2004, Philadelphia, USA, 2004: 99-104.
- [12] Gierull C H. Ground moving target parameter estimation for two-channel SAR. *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 53(3): 224-233.
- [13] 张焕胜, 祁海明, 杨汝良. 基于最小二乘估计和小波去噪的 ATI-SAR 自适应相位校正方法. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1073-1076.
- Zhang Huan-sheng, Qi Hai-ming, and Yang Ru-liang. Phase calibration method for ATI-SAR system based on least square estimation and wavelet-denoising. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(5): 1073-1076.
- 周 红: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像、SAR/GMTI.
- 黄晓涛: 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR/GMTI、SAR 阵列信号处理、SAR 系统设计.
- 常玉林: 男, 1980 年生, 博士, 研究方向为 SAR/GMTI、SAR 图像配准、SAR 成像.