

基于三通道 UWB SAR 子孔径图像序列的 ATI 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, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对三通道超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)系统, 提出了一种基于子孔径图像序列的顺轨干涉(ATI)方法, 利用 UWB SAR 的大波束角特性, 生成多个视角的子孔径顺轨干涉图检测运动目标并估计参数. 该方法相比传统的 ATI 方法的优点在于: 不仅能检测具有距离向速度不为零的目标, 而且能检测具有方位向速度不为零的目标, 并可估计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: 超宽带; 合成孔径雷达; 顺轨干涉; 子孔径图像; 地面运动目标检测

中图分类号: TN959.173; TN959.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)052093-07

Along Track Interferometry Method Based on Sub2Aperture Image Series for Triple2Channel UWB SAR

ZHOU Hong, HUANG Xiao2tao, CHANG Yu2lin, ZHOU Zhi2min

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

Abstract: An Along Track Interferometry (ATI) method based on sub2aperture image series for triple2channel Ultra2Wide Band Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) system is proposed. By exploiting the large beamwidth characteristic of UWB SAR, the method generates a series of sub2aperture ATI images with different view2angles for moving target detection and parameter estimation. This method has two improvements over traditional ATI method. Firstly it detects the moving target with non2zero range velocity or non2zero azimuth velocity. Secondly both range velocity and azimuth velocity can be estimated via the method. The experiments based on UWB SAR half2real echo demonstrate the effectiveness of the method.

Key words: ultra2wide band; synthetic aperture radar; along track interferometry; sub2aperture image; ground moving target detection

1 引言

利用多通道超宽带合成孔径雷达(Ultra2Wide 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. 目前多通道 SAR/GMTI 方法包括相位中心偏置天线(Displaced Phase Centre Antenna, DPCA)^[1]、顺轨干涉(Along Track Interferometry, ATI)^[2]、空时自适应处理(Space2Time Adaptive Processing, STAP)^[3]. 其中 ATI 方法采用 SAR 成像作为运动目标检测的预处理手段, 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, 在近几年重新受到国内外关注^[4~6]. 传统的 ATI 方法均针对双通道全孔径图像进行, 对于正侧视 SAR 系统, 运动目标的双通道干涉相位

ϕ 由距离向速度 v_r 决定:

$$\phi = -\frac{4\pi v_r \sin \theta}{K} \frac{U}{v_a} B \quad (1)$$

而与方位向速度无关. (式(1)中 K 、 U 、 v_a 、 B 分别表示系统载频、天线入射角、载机距离向速度和基线长度). 因此, 传统双通道 ATI 方法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.

本文提出了一种新的 ATI 方法)) 基于三通道子孔径图像序列的 ATI 方法(简称多子孔径 ATI 方法), 既能检测距离向速度不为零的目标, 又能检测方位向速度不为零的目标, 并可估计目标的距离向速度和方位向速度. 该方法首先将 UWB SAR 三通道全孔径图像进行 DPCA 处理以抑制杂波, 然后利用系统在方位向的大波束角特性, 将全孔径数据的多普勒谱划分为多个子孔径, 生成一系列指示了不同地面视角的子孔径图像, 再

将相同视角的每一对子孔径图像进行顺轨干涉. 在子孔径干涉图序列中, 运动目标的干涉相位随子孔径视角变化, 并与其距离向和方位向速度有关, 而静止目标的干涉相位恒为零. 多子孔径 ATI 方法根据这一区别, 联合多幅子孔径干涉图检测运动目标, 利用目标的干涉相位序列估计距离向速度和方位向速度, 从而克服了传统 ATI 方法只能检测和估计具有距离向速度目标的缺陷.

作为本文方法的基础, 第 2 部分研究了运动目标在子孔径图像上的聚焦位置和干涉相位; 第 3 部分根据目标干涉相位随子孔径视角变化的规律, 提出了多子孔径 ATI 方法的原理; 第 4 部分给出了多子孔径 ATI 方法的实现流程, 讨论了其中的子孔径图像生成等问题; 第 5 部分利用半实测回波数据验证了本文方法的有效性.

2 运动目标在子孔径图像上的聚焦位置和干涉相位

运动目标干涉相位随子孔径视角变化的规律是区分动静目标、估计目标速度的依据. 为此本部分首先推导了慢速运动目标在子孔径图像上的聚焦位置和干涉相位, 由于目标速度较快而引起的干涉相位起伏将在第 3 部分进行讨论. 为简化分析, 所有推导在理想的无杂波双通道条件下展开, 所得结论适用于三通道方法, 因为它增加的 DPCA 处理是线性运算.

2.1 运动目标在子孔径图像上的聚焦位置

如图 1 建立双通道正侧视条带 SAR 对地观测几何, 其中右侧将雷达对目标成像位置的瞬时观测视角 H (t_m) 和下视角 U 放大标出. 载机沿 X 方向以恒速 v_a 运动, 设零时刻天线一位于 $(x_a, 0, h)$, 在顺轨方向天线二位于 $(x_a + B, 0, h)$, 此时刻一个点目标位于地面上 (x_T, y_T) 处, 具有恒定的地面速度 (v_x, v_y) , 设天线为单发单收. 定义如下参数

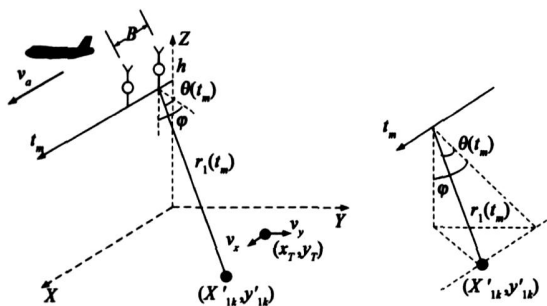


图1 双通道 SAR 对地观测几何

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

$$X = \frac{(x_T - x_a)(v_a - v_x) - y_T v_y}{V} \quad (3)$$

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

其中 V 是目标速度与载机速度的矢量和, C 称为相对速度, 它是 V 与载机速度的比值, (X, Y) 为目标在全孔径图像上的成像位置^[7]. 作者在文献[7]中通过将运动目标与某一静止目标的距离迁徙曲线 (Range Migration Curve, RMC) 在子孔径内部等效, 推导了运动目标在单通道子孔径 UWB SAR 图像上的成像位置, 并得到了聚焦条件下, 子孔径图像方位分辨率和系统参数对 C 范围的约束. 当 CU_1 、子孔径图像对应的相干积累时间较短时, 运动目标在天线一第 k 幅子孔径图像 I_{1k} 上聚焦在 (X_{1k}^c, R_{1k}^c) 处:

$$\begin{cases} X_{1k}^c = x_k(1 - C^2) + CX \\ R_{1k}^c = \sqrt{h^2 + Y^2 + C^2(1 - C^2)(x_k - X/C)^2} \end{cases} \quad (5)$$

其中 x_k 为子孔径中心的时域位置. 由于 SAR 图像是离散的, 目标聚焦像的峰值在离 (X_{1k}^c, R_{1k}^c) 最近的采样点 $(X_{1k}^c + \$X_{1k}, R_{1k}^c + \$R_{1k})$ 处取得. 将天线二的回波以时间差 B/v_a 配准, 同理推导得该目标在天线二第 k 幅子孔径图像 I_{2k} 上的聚焦位置 (X_{2k}^c, R_{2k}^c) :

$$\begin{cases} X_{2k}^c = x_k(1 - C^2) + C[X + B(C - \cos A)] \\ R_{2k}^c = \sqrt{h^2 + (Y - B \sin A)^2 + C^2(1 - C^2)(x_k - X/C)^2} \end{cases} \quad (6)$$

其中 A 满足 $\cos A = (v_a - v_x)/V$. 式(5)和(6)差别很小, 不超过一个分辨单元, 因此运动目标在 I_{2k} 上聚焦像的峰值点也是 $(X_{1k}^c + \$X_{1k}, R_{1k}^c + \$R_{1k})$.

2.2 运动目标在子孔径干涉图上的相位

(1) 运动目标在子孔径图像上的相位

令 B_s 为信号带宽在 I_{1k} 上运动目标距离向脉冲压缩后的信号可表示为

$$s(t, t_m) = \text{sinc}\left[\frac{2P}{S_T}\left(t - \frac{2}{c}\sqrt{R_{1k}^2 + (v_a t_m - X_{1k}^c)^2}\right)\right] \exp\left[-j\frac{4P}{K}\left(\sqrt{R_{1k}^2 + (v_a t_m - X_{1k}^c)^2}\right)\right] \quad (7)$$

根据后向投影 (Back Projection, BP) 成像算法, 目标在 $(X_{1k}^c + \$X_{1k}, R_{1k}^c + \$R_{1k})$ 处的复值等于 $s(t, t_m)$ 沿 RMC 在相干积累时间 T 内的积分:

$$\begin{aligned} I_{1k}(X_{1k}^c + \$X_{1k}, R_{1k}^c + \$R_{1k}) &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s\left(\frac{2}{c}\sqrt{(R_{1k}^c + \$R_{1k})^2 + (v_a t_m - X_{1k}^c - \$X_{1k})^2}, t_m\right) \\ &\quad \times \exp\left[j\frac{4P}{K}\sqrt{(R_{1k}^c + \$R_{1k})^2 + (v_a t_m - X_{1k}^c - \$X_{1k})^2}\right] dt_m \\ &\quad \times \exp\left[j\frac{4P}{K}R_{1k}\right] \exp\left[-j\frac{4Pv_a t_m - X_{1k}^c}{K r_1(t_k)} \$X_{1k}\right] \text{sinc}\left(\frac{2B_s \$R_{1k}}{c}\right) \\ &\quad \times \text{sinc}\left(\frac{2S X_{1k}}{K r_1(t_k)} v_a T\right) \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $r_1 = \sqrt{R_{1k}^2 + (v_a t_m - X_{1k}^c)^2}$. 定义 $H(t_m)$ 的离散值 H

为第 k 个子孔径视角,它是载机实时飞行位置与目标成像位置的视角,即满足 $\cos H_k = R_{1k}^c / r_1(t_k)$,并且由子孔径中心多普勒 f_{k1} 决定:

$$H_k = \arcsin \frac{f_{k1} K}{2v_a} \tag{9}$$

则该运动目标在 $I_{1k}(X_{1k}^c + X_{1k}, R_{1k}^c + R_{1k})$ 处的相位:

$$\varphi_{1k} = \frac{4P}{K} (R_{1k} \cos H_k + X_{1k} \sin H_k) \tag{10}$$

同理由式(6)得运动目标在 $I_{2k}(X_{1k}^c + X_{1k}, R_{1k}^c + R_{1k})$ 处的相位:

$$\varphi_{2k} = \frac{4P}{K} [(R_{1k} + R_{1k} - R_{2k}) \cos H_k + (X_{1k} + X_{1k} - X_{2k}) \sin H_k] \tag{11}$$

(2) 运动目标在子孔径干涉图像上的相位

将 I_{1k} 和 I_{2k} 进行顺轨干涉,由式(5),(6),(10),(11)得 $(X_{1k}^c + X_{1k}, R_{1k}^c + R_{1k})$ 处的干涉相位 φ_k :

$$\varphi_k = \varphi_{1k} - \varphi_{2k} = -\frac{4P}{K} [\frac{v_y}{V} B \sin U \cos H_k - (C - \cos A) B \sin H_k] \tag{12}$$

其中下视角 U 由 $\sin U = \frac{Y}{\sqrt{h^2 + Y^2}}$ 定义.对慢速目标有 $VU \approx v_a - v_x$,于是

$$\varphi_k \approx U - \frac{4PB}{Kv_a} (v_y \sin U \cos H_k + v_s \sin H_k) > -\frac{4PB}{Kv_a} v_{rk} \tag{13}$$

其中定义目标的径向速度为 $v_{rk} = v_y \sin U \cos H_k + v_s \sin H_k$,在几何意义上它是目标速度矢量在 H_k 方向的投影.特别地,当 $H_k = 0$ 时得到与传统全孔径 ATI 方法一致的结论:

$$\varphi_k \approx U - \frac{4Pv_y \sin U}{K v_a} B \tag{14}$$

2.1.3 杂波抑制对干涉相位的影响

由于 DPCA 是线性运算,因此无杂波双通道条件下目标的干涉相位和成像位置与三通道方法的情形相同.这一结论也可由以下推导得到,设配准后的三通道全孔径图像为 S_1, S_2 和 S_3 :

$$S_i = S e^{-j\varphi_i}, \quad i = 1, 2, 3 \tag{15}$$

其中 S 为幅度, $\varphi_i (i = 1, 2, 3)$ 为相位. DPCA 处理后得到两幅无杂波的全孔径图像 S_A, S_B , 分别生成子孔径图像序列为 $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1K}$ 和 $I_{21}, I_{22}, \dots, I_{2K}$, 则第 k 幅子孔径干涉图由下式给出:

$$\begin{aligned} I_{1k} \# I_{2k}^* &= [S_A^a h(H_k)] \# [S_B^a h(H_k)]^* \\ &= [(S_2 - S_1)^a h(H_k)] \# [(S_3 - S_2)^a h(H_k)]^* \end{aligned} \tag{16}$$

其中 $h(H_k)$ 是划分子孔径的滤波器的时域形式, a 表示卷积, * 表示共轭.假设通道特性、天线方向图一致,此

时 DPCA 具有很好的杂波抑制效果,设通道间基线长度相等,有 $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi_3 - \varphi_2$, 式(16)也可写为:

$$\begin{aligned} I_{1k} \# I_{2k}^* &= [(S_1 e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)} - S_1)^a h(H_k)] \\ &\quad \# [(S_2 e^{-j(\varphi_3 - \varphi_2)} - S_2)^a h(H_k)]^* \\ &= [S_1^a h(H_k)] \# [S_2^a h(H_k)]^* |e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)} - 1|^2 \end{aligned} \tag{17}$$

而无杂波双通道子孔径干涉图为:

$$I_{1k} \# I_{2k}^* = [S_1^a h(H_k)] \# [S_2^a h(H_k)]^* \tag{18}$$

式(17)和(18)仅相差一个幅度项.因此目标在三通道系统子孔径图像上的成像位置和干涉相位的变化规律也可用式(13)描述.

3 多子孔径 ATI 方法的原理

由式(13)可知,运动目标的干涉相位随子孔径视角变化,而静止目标的干涉相位恒为零,从图2的仿真结果可直观地观察到这一区别,其中目标速度列于表1,采用与第五部分实验相同的 UWB SAR 系统参数.因此即使 v_y 为零的运动目标在某些视角的子孔径干涉图中,干涉相位不等于零,也可以被检测出来.多子孔径 ATI 方法利用这一规律,综合多幅子孔径干涉图对运动目标进行联合检测,并关联多个干涉相位估计目标的距离向速度和方位向速度,从而将 ATI 方法估计一维速度的能力扩展到了二维.

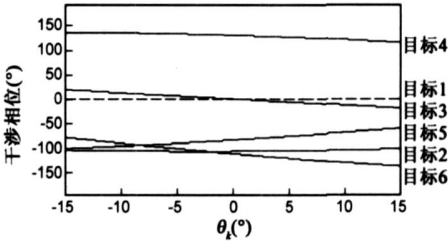


图2 各目标子孔径干涉相位
表1 目标速度设置

目标	1	2	3	4	5	6
方位向速度 m/s	0	0	3	2	23	5
距离向速度 m/s	0	5	0	26	4	5

分析干涉相位的变化规律可知,由于目标速度较小,不出现相位缠绕,干涉相位是 H_k 的连续函数.因此多幅子孔径干涉图联合检测在具体实现时,可先在各幅干涉图中结合幅度和相位门限检测出运动目标^[6],再关联同一目标的干涉相位序列,并依以下准则判决:若目标在视角不相邻的几幅干涉图中、或在连续 N 幅以上干涉图中相位为零,判决它不是运动目标.判决门限 N 由以下推导得出.由式(13)使 v_{rk} 等于零的 H_{k0} 在 $[-P/2, P/2]$ 范围有唯一解:

$$H_{k0} = \arctan(-v_y \sin U / v_x) \tag{19}$$

取子孔径视角间隔为固定值 ΔH 将 H_k 写为 $H_{k0} + (k -$

k_0)# \$ H 的形式, 则 v_{rk} 在 H_{k_0} 处一阶 Taylor 展开式为:

$$v_{rk} U(k - k_0) \# H_{k_0} v_x / \cos H_{k_0} \quad (20)$$

以 ? 1b 为判断干涉相位是否为零的门限, 由式 (13) (20) 得, 目标在满足下式的所有第 k 幅子孔径干涉图中相位为零, 因此 N 是这些子孔径干涉图的总数:

$$|k - k_0| < \frac{v_a \cos H_{k_0}}{720 B_{v_x} \# H} \quad (21)$$

在检测出运动目标并关联其干涉相位后, 为估计目标速度, 首先由目标的干涉相位序列建立关于二维速度分量 v_x, v_y 的超定方程组:

$$\begin{bmatrix} \sin H_1 & \sin U \cos H_1 \\ \sin H_2 & \sin U \cos H_2 \\ \vdots & \vdots \\ \sin H_K & \sin U \cos H_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{-K_a}{4PB} \begin{bmatrix} \#_1 \\ \#_2 \\ \vdots \\ \#_K \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中 K 为子孔径个数, 子孔径视角分别为 H_1, H_2, \dots, H_K , 干涉相位序列为 $\#_1, \#_2, \dots, \#_K$, 对目标速度的估计可转化为线性最小二乘估计^[8], 在未知变量较少时 (此处为两个), 正则方程法计算简单、性能较好, 当相位噪声服从正态分布时, 该方法估计结果是最小方差无偏估计. 将式 (22) 写为 $AX = b$ 的形式, 则解为 $X = (A^T A)^{-1} A^T b$, 从而得到

$$\begin{cases} v_x = \frac{-K_a \sum_{k=1}^K \#_k [\sin H_k (K + \sum_{k=1}^K \cos 2H_k) - \cos H_k \sum_{k=1}^K \sin 2H_k]}{2PB \# [K^2 - K - 2 \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \cos(2H_i - 2H_j)]} \\ v_y = \frac{-K_a \sum_{k=1}^K \#_k [\cos H_k (K - \sum_{k=1}^K \cos 2H_k) - \sin H_k \sum_{k=1}^K \sin 2H_k]}{\sin U 2PB \# [K^2 - K - 2 \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \cos(2H_i - 2H_j)]} \end{cases} \quad (23)$$

而单视干涉相位噪声 $R_{\#_k}^2$ 与信噪比 (Signal to Noise Ratio, SNR) 有如下关系^[9]:

$$R_{\#_k}^2 = \frac{SNR + 0.5}{SNR^2} \quad (24)$$

因此由式 (22), (24) 得 v_x, v_y 的方差, 均为 SNR 和 K 的减函数.

$$\begin{cases} R_{v_x}^2 = \frac{SNR + 0.5}{SNR^2} \left(\frac{K v_a}{4PB} \right)^2 \frac{2K + 2 \sum_{k=1}^K \cos 2H_k}{K^2 - K - 2 \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \cos(2H_i - 2H_j)} \\ R_{v_y}^2 = \frac{SNR + 0.5}{SNR^2} \left(\frac{K v_a}{4PB \sin U} \right)^2 \frac{2K - 2 \sum_{k=1}^K \cos 2H_k}{K^2 - K - 2 \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K \cos(2H_i - 2H_j)} \end{cases} \quad (25)$$

解出 (v_x, v_y) 后, 由 (X_{1k}^c, R_{1k}^c) 及式 (2), (5) 可估计运动目标的初始位置参数 (x_T, y_T) :

$$\begin{cases} x_T = \frac{(v_a - v_x)}{v_a} \# [X_{1k}^c + \frac{(1 - C^2) \tan H_k \# R_{1k}^c}{\sqrt{1 + C^2 (1 - C^2) \tan^2 H_k}}] \\ + \frac{v_y}{\sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2}} \# \frac{R_{1k}^c}{\sqrt{1 + C^2 (1 - C^2) \tan^2 H_k}} h^2 \\ y_T = - \frac{v_y}{v_a} \# [X_{1k}^c + \frac{(1 - C^2) \tan H_k \# R_{1k}^c}{\sqrt{1 + C^2 (1 - C^2) \tan^2 H_k}}] \\ + \frac{(v_a - v_x)}{\sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2}} \# \frac{R_{1k}^c}{\sqrt{1 + C^2 (1 - C^2) \tan^2 H_k}} h^2 \end{cases} \quad (26)$$

前面讨论了慢速运动目标的检测与参数估计, 将多子孔径 ATI 方法运用于快速运动目标将产生两个方面的问题. 首先, 运动目标在子孔径图像上散焦明显, 并且成像轨迹上的干涉相位出现起伏. 国防科技大学常玉林等对散焦目标的顺轨干涉相位进行了研究^[10], 认为目标成像轨迹的干涉相位中值与理论上的常数相位值 (式 (13)) 相同, 因此提取干涉相位中值可估计出散焦目标的干涉相位. 其次, 目标速度过大引起干涉相位出现缠绕, 使联合检测和速度估计算法不再适用, 传统 ATI 方法在检测具有较大距离向速度运动目标时, 也会导致同样的问题. 解决 ATI 方法的盲速和速度缠绕, 可通过多基线或多子带的方式解决^[10].

4 多子孔径 ATI 方法的实现

多子孔径 ATI 方法的实现流程 (如图 3 所示) 可通过以下 5 个步骤实现:

Step1 对配准后的三幅全孔径图像进行 DPCA 处理, 得到两幅经杂波抑制的全孔径图像 S_A 和 S_B .

Step2 由 S_A 生成子孔径图像序列 $I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1K}$, 由 S_B 生成 $I_{21}, I_{22}, \dots, I_{2K}$.

Step3 将每一对来自两幅全孔径图像的、具有相同视角的子孔径图像 I_{1k} 和 I_{2k} 顺轨干涉.

Step4 在每幅子孔径图像中检测后, 综合多幅子孔径干涉图对运动目标进行联合检测, 并关联同一运动目标的干涉值.

Step5 由目标干涉相位序列估计其距离向速度、方位向速度及初始位置.

其中几个具体实现问题需要加以说明和讨论:

(1) 子孔径图像的生成. 通过分析 UWB SAR 回波频谱与图像频谱的关系, 以及子孔径视角与子孔径多普勒中心频率的关系 (见式 (9)) 知, 在多普勒域划分子孔径有两种方式: 回波域二维带通滤波和图像域二维带通滤波. 本文选择后一种方式是基于以下考虑: (a) 由于子孔径图像分辨率相比全孔径图像降低, 将全孔径图像进行配准和 DPCA 处理后再生成子孔径图像可保证精度; (b) 运算量相对较小.

(2)子孔径参数选取.子孔径参数包括积累角和视角,前者决定了图像的方位向分辨率,需要满足目标聚焦的要求^[7].对于后者,由于运动目标的多普勒中心偏移,杂波的边缘区域不含运动目标信号,必须避免选择这个区域的子孔径频段对应的视角.为得到可用的子孔径视角范围,首先根据系统参数确定使目标不散焦的速度极大值 v_{ymax} ,再由 H 与多普勒频率的关系可推导出:

$$|H| < A \left(\frac{1}{2} - \arcsin \left(\frac{v_{\text{ymax}} \sin U}{v_a} \right) \right) \quad (27)$$

其中 A 是与方位窗函数有关的系数, $($ 为主波束角.由式(27)也可知,在高波段由于 $($ 非常小,目标完全偏移出杂波谱,使式(27)右端小于 0, H 无可选用的范围.

(3)运动目标关联.运动目标在不同子孔径图像上的位置(见式(5))随子孔径视角变化,而多子孔径 ATI 方法对子孔径视角近似连续取值,因而运动目标在子孔径图像序列上的成像位置也是连续变化的.根据这一特性,可将运动目标在相邻子孔径图像中的位置关联起来,从而可将其幅度和相位进行关联.

(4)目标在单幅子孔径图像上的干涉相位估计.由前面的讨论可知,对于未引起干涉相位缠绕的运动目标,即使其速度较快,都可以通过提取目标成像轨迹的干涉相位中值来估计其理论的常数干涉相位.

5 实验

5.1 多子孔径 ATI 方法的实现

由于目前还没有可利用的多通道 UWB SAR 实测数据,本文利用单通道 UWB SAR 实测回波以抽样的方式生成三通道静止杂波,再叠加仿真的三通道运动目标回波及噪声,由此生成包含静止杂波信号、噪声和运动目标信号的三通道回波数据即半实测回波数据,参数如表2所示.模拟多通道回波的依据是空时等效原理,

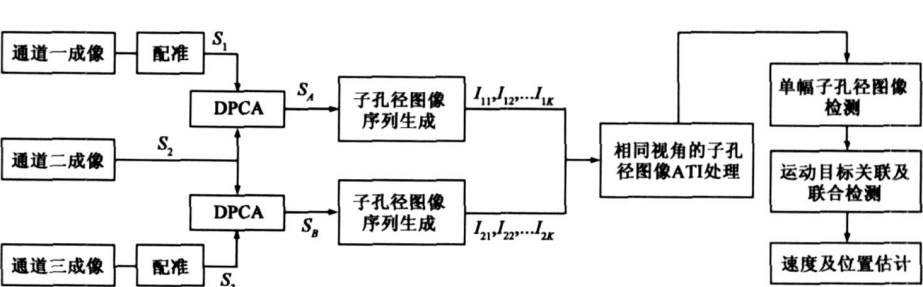


图3 三通道多子孔径ATI方法实现流程

它以各个通道起始点的位置差作为基线长度,并通过抽样方式使各个通道数据是原单通道数据不相交的子集,保证了各通道间数据的独立性.

运动目标参数及多子孔径 ATI 方法处理结果如表 3、图 4~ 图 6 所示.其中图 4 是通道一的全孔径成像结果.按照本文方法流程,执行前 3 步后截取含目标的区域,并通过幅度设置门限消除噪声影响,得到干涉相位组图 5,图 6 表示图 5 中相位与颜色的关系.有关参数说明如下:由式(27)解得 $H < 101 \text{ dB}$,取子孔径视角分别为 $-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$;子孔径图像方位分辨率为 412 m ;由式(21)解得 $k = k_0$,因此任何运动目标最多有一个子孔径干涉相位等于零.经过多子孔径 ATI 方法处理,所有运动目标都被检测到,如表 3 所列,速度估计值的绝对误差不超过 0.136 m/s ,初始位置估计值的绝对误差不超过一个分辨单元.而传统的 ATI 方法无法检测和估计仅具有方位向速度的目标 2 和目标 4,并且只能近似估计目标位置的方位偏移量.

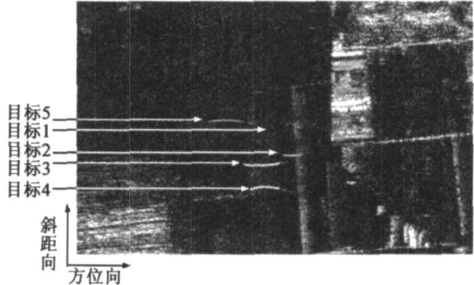


图4 通道一全孔径成像(范围:斜距向5624 m~5924 m,方位向574~1297.8 m)



图5 各视角子孔径干涉图(截取含运动目标区域)

表2 UWB SAR 多通道系统参数

信号载频及带宽	信号脉宽 L_s	PRF Hz	中心斜距 m	载机速度 m/s	基线 m	载机高度 m	主波束角	SNR dB
UHF 波段, 超宽带	20	250	5774	115	3	3000	30°	22

表3 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			方位向初始位置 m			距离向初始位置 m		
	真实值	估计值	绝对误差	真实值	估计值	绝对误差	真实值	估计值	绝对误差	真实值	估计值	绝对误差
1	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	915.6	915.6	0.0	5773.6	5773.6	0.0
2	3	2.64	0.36	0	0.00	0.00	865.6	868.5	2.9	5730.9	5730.9	0.0
3	23	22.84	0.16	4	3.98	0.02	1015.6	1014.7	0.9	5756.5	5756.7	0.2
4	22	22.12	0.12	0	20.03	0.03	915.6	916.7	1.1	5705.4	5705.6	0.2
5	2	1.86	0.14	25	25.12	0.12	715.6	717.1	1.5	5773.6	5774.3	0.7



图6 干涉相位(°)与颜色的对应关系

512 多子孔径 ATI 方法的性能评估

在 511 实验的三通道回波中加入 40 个仿真运动点目标, 进行十五组多子孔径 ATI 实验, 统计在不同的信噪比和子孔径个数条件下的两个性能参数) 检测概率和速度估计误差. 实验中虚警概率给定为 10^{-3} , 子孔径图像方位分辨率不变; 速度估计误差是检测出的目标的速度误差的均方根. 子孔径图像的增多为多子孔径

ATI 方法提供了更多的样本, 从而使检测概率增加, 速度估计误差降低; 信噪比的增加同样会提高该方法的性能))) 这都与实验的统计结果图 7~ 图 8 吻合. 速度误差估计曲线与式的理论推导相符, 它在子孔径个数等于 5 时的取值也与 511 中的实验结果接近. 本文所模拟的多通道数据经 DPCA 处理杂波抑制效果较好, 以此为背景的性能评估实验表明, 当子孔径个数大于 5, $SNR > 20dB$ 时, 采用多子孔径 ATI 方法对运动目标具有很好的检测和估计效果.

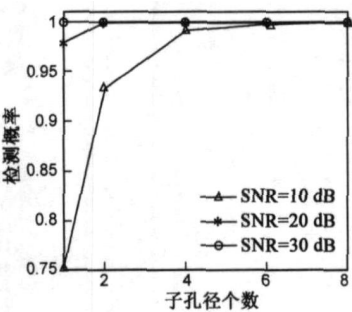
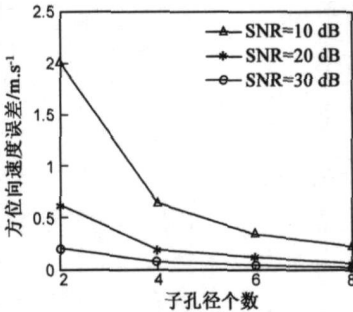
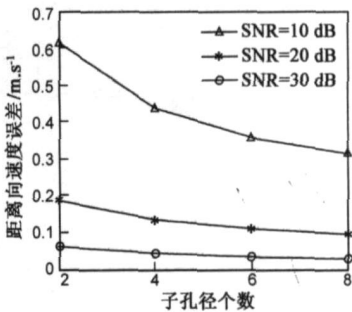


图7 检测概率



(a) 方位向速度估计误差



(b) 距离向速度估计误差

图8 速度估计误差

6 结论

多子孔径ATI 方法能检测具有距离向速度和方位向速度的地面运动目标, 并估计目标的距离向速度和方位向速度. 本文利用半实测回波实现了多子孔径 ATI 方法, 并在不同子孔径个数和 SNR 条件下进行了分组实验, 检测与估计的性能与理论推导符合; 当杂波被完全抑制、子孔径个数较多、SNR 较高的条件下, 该方法的检测性能和估计精度令人满意.

参考文献:

[1] 王永良, 陈建文, 吴志文. 现代 DPCA 技术研究[J]. 电子学报, 2000, 28(6): 118- 201.
Wang Yongliang, Chen Jianwen, Wu Zhizhen. Research on modern DPCA techniques[J]. Acta Electronical Sinical, 2000, 28(6): 118-201. (in Chinese)

[2] Curtis W Chen. Performance Assessment of Along-Track Interferometry for Detecting Ground Moving Targets[A]. Proceedings of IEEE International of Radar Conference 2004[C]. Philadelphia, Pennsylvania: IEEE Press, 2004. 99- 104.
[3] W L Melvin. A STAP overview[J]. Chevy Chase, Maryland: IEEE A&E Systems Magazine, 2004, 19(1): 19- 34.
[4] Z Yang, M Soumekh. Adaptive Along-Track Multichannel SAR Interferometry for Moving Target Detection and Tracking[A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference 2005[C]. Arlington, Virginia: IEEE Press, 2005. 337- 342.
[5] Elaine Chapin and C. W. Chen. Preliminary Results from an Airborne Experiment Using Along-Track Interferometry for Ground Moving Target Indication[A]. Proceedings of IEEE International Radar Conference 2005[C]. Arlington, Virginia: IEEE Press, 2005. 343- 347.
[6] Yuhong Zhang. Along Track Interferometry Synthetic Aperture Radar (ATDSAR) Techniques for Ground Moving Target De-

tection[R]. New York: Air Force Research Laboratory, 2006. 46- 49.

- [7] Zhou Hong, Huang Xiaotao, Chang Yulin, Zhou Zhimin. Single Channel UWB SAR Ground Moving Targets Detection Method Using Change Detection Based on Single Pass Sub Aperture Images[A]. Wu Shunjun, 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings[C]. Huangshan: IEEE Press, 2007. 266- 270.
- [8] Steven M Kay. 统计信号处理基础: 估计理论[M]. 罗鹏飞, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 185- 199.
- [9] Alan A. Thompson and Charles E. Livingstone. Moving Target Performance for RADARSAT2[A]. Proceedings of IGARSS 2000[C]. Richmond, BC, Canada: IEEE Press, 2000. 2599- 2601.
- [10] 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[J]. 信号处理, 2008, 24(5): 742- 746.

作者简介:



周 红 女, 1982 年生于广西桂林, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院博士研究生, 研究方向为 SAR 成像、SAR/ GMTI.

E-mail: hongzhou118@yahoo. com. cn 或 c_1_0@s2hu. com



黄晓涛 男, 1972 年生于湖北武汉, 现为国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师, IEEE 会员、中国电子学会高级会员, 研究方向为 SAR/ GMTI、SAR 信号处理、SAR 阵列信号处理、SAR 系统设计. 已在国内外期刊和会议发表学术论文 70 余篇, 获得国家科技进步二等奖 1 项.

E-mail: hxt dh@yahoo. com