

基于 Chirp-Z 变换的分布式 SAR 地面运动目标检测方法

赵迎辉^{①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文基于主辅星编队模式下的分布式卫星 SAR 系统, 对 Range-Doppler 域地面运动目标检测方法进行了改进, 提出回波信号经方位向相位补偿后, 应用 Chirp-Z 变换能够将地面同一方位单元回波的频谱在不同通道内精确配准, 而后通过干涉处理和频谱相位补偿来提取运动目标信息, 并给出了频谱相位补偿对系统参数的约束条件以及频谱配准对目标速度的约束条件。最后仿真表明该方法在约束条件下是有效的。

关键词: 分布式 SAR; GMTI; 相位补偿; CZT

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1056-04

A New GMTI Method Based on Chirp-Z Transform for Distributed Satellites Interferometric SAR

Zhao Ying-hui^{①②} Wang Yan-fei^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Distributed satellites interferometric SAR is capable of detecting ground moving targets via along-track baseline. In this paper, the signal model and phase compensation for this INSAR system is analyzed firstly. A new method based on Chirp-Z transform for GMTI in range-Doppler domain is proposed. The received data of different channels can be co-registered precisely along azimuth direction after being transformed into Doppler domain via CZT, and moving target can be detected through interferometry procedure combined with spectrum phase compensation. In the end, the constraints of multistatic SAR configuration by spectrum phase compensation and target motion by spectrum co-registration are discussed. The final simulation demonstrates that this algorithm can detect moving target efficiently.

Key words: Distributed SAR; GMTI; Phase compensation; CZT(Chirp-Z Transform)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)能够对地表成像, 借助多通道沿航迹干涉(AT-INSAR)技术还可以检测地面运动目标尤其是慢速目标。典型的 AT-INSAR 方法是沿航迹排列两幅天线, 以同样几何关系先后辐照同一地域, 对两路通道数据进行配准, 利用干涉技术来抑制地杂波^[1]。分布式卫星系统将天线分置于不同星体上, 合理设计星座构形也可获得稳定的沿航迹基线分量, 以此执行运动目标检测任务^[2]。

对于主辅星编队模式下的分布式卫星 SAR 系统, 为实现辐照区的空间同步, 不同卫星天线将以不同角度辐照同一地域^[3]。文献[4-6]提出在距离-多普勒(Range-Doppler)域内检测运动目标, SAR 回波信号经距离向处理, 在方位向首先进行相位补偿, 可以去除由天线波束指向引起的 Doppler 中心频率偏置和线性调频项, 而后对两路通道数据进行配准, 通过一组窄带滤波器, 在频域内对两路通道数据作干涉处理

完成检测任务。

本文基于主辅星编队工作模式, 对 Range-Doppler 域地面运动目标检测方法进行了改进, 提出经方位向相位补偿后, 直接应用 Chirp-Z 变换(CZT)进行窄带滤波, 而后通过干涉处理来检测地面运动目标。应用 CZT 能够仅选取天线辐照区所对应的回波频段, 将地面方位单元一一映射到频域中, 并在滤波同时完成两路通道数据的频谱配准。为了有效检测运动目标, 本文还推导了频谱配准对目标速度的约束条件和干涉阶段对系统参数的约束条件。最后通过仿真验证了本方法的有效性。

2 SAR 回波信号方位向相位补偿

在图 1 中, 主星 S0 发射信号, 辅星 S1 和 S2 接收信号, 为实现空间同步, 其天线波束均指向阴影地域, 卫星飞行速度为 V 。Oxyz 为相对运动坐标系, O 为参考卫星质心, x 轴背向地心, y 轴指向卫星飞行方向, z 轴与 x, y 轴构成右手系, 0 时刻地面某点 P 位于波束中心。

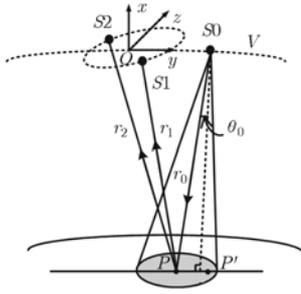


图1 分布式卫星 INSAR 系统几何示意图

P 点相对于卫星 S_0, S_1, S_2 的距离变化历史 $R_0(t), R_1(t), R_2(t)$ 为^[7]

$$R_i(t) = |\mathbf{S}_i(t) - \mathbf{P}| \approx r_i - V \sin \theta_i t + (V^2 \cos^2 \theta_i / (2r_i)) t^2 \quad (1)$$

$i=0, 1, 2$, 与 S_0, S_1, S_2 相对应, r_i 为卫星天线到辐照区中心的距离, θ_i 为卫星斜视角。对于该距离门上与 P 点相距 y 的点目标 P' , 有 $R'_i(t) = R_i(t - t_y)$, 其中 $t_y = y/V$, 表示经 t_y 时间波束中心到达 P' 。

在地面平坦假设下, 以 $s_1(t; t_y), s_2(t; t_y)$ 分别表示经距离向处理后 S_1, S_2 接收的点目标 P' 信号, 对其进行方位向相位补偿, 点 P' 所在距离门上卫星 S_1, S_2 的参考函数分别取作 $s_{i,\text{ref}}(t) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(R_0(t)+R_i(t))}$, $i=1, 2$, λ 为雷达信号波长。将参考函数分别与 $s_1(t; t_y), s_2(t; t_y)$ 相乘, 得到结果如下:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_i(t; t_y) &= a_i(t - t_y) e^{j\varphi_0} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}((R_0(t)+R'_i(t)) - (R_0(t)+R_i(t)))} \\ &= a_i(t - t_y) e^{j\varphi_0} e^{j(2\pi f_{i,t_y} t - C_{i,t_y})} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $a_i(t)$ 与天线方向图相对应, $e^{j\varphi_0}$ 表示由地面后向散射系数引起的相位变化, 而

$$f_{i,t_y} = \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right) \frac{V^2}{\lambda} t_y \quad (3)$$

$$C_{i,t_y} = \frac{2\pi}{\lambda} V (\sin \theta_0 + \sin \theta_i) t_y + \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{2r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{2r_i} \right) V^2 t_y^2 \quad (4)$$

3 CZT 用于方位向窄带滤波和频谱配准

对式(2)进行频谱分析, 得到其 Doppler 频域表达式为

$$\tilde{S}_i(f; t_y) = CA_i(f - f_{i,t_y}) e^{-j2\pi(f - f_{i,t_y})t_y} e^{j(\varphi_0 - C_{i,t_y})} \quad (5)$$

$A_i(f)$ 为 $a_i(t)$ 的 Fourier 变换, 表现为窄带信号, 一般情况下二者相同。静止目标回波经方位向相位补偿后为窄带信号, 其频谱中心位置与方位位置一一对应, 若目标相对于辐照区中心的位置为 $V \cdot t_y$, 则其频谱将处于 f_{i,t_y} , 由于 S_1 和 S_2 到辐照区中心的距离 r_1, r_2 不相等, 因此 $f_{1,t_y} \neq f_{2,t_y}$, 两通道频谱存在偏移。设图1辐照区两端 A, B 到中心的距离分别为 $V \cdot t_{y1}$ 和 $V \cdot t_{y2}$, 图2(a)为两通道频谱示意图, 尖峰表示 $V \cdot t_y$ 处的点目标频谱, 其频率分辨宽度 B 与 $A_i(f)$ 主瓣相对应, 而阴影部分则代表整个辐照区频谱。

文献[4,6]提出在 Range-Doppler 域内检测运动目标, 采

用一组窄带滤波器对信号 $\tilde{s}_1(t; t_y), \tilde{s}_2(t; t_y)$ 滤波, 结合式(3), 由于卫星平台速度很高, 因此同一目标在两通道内的频谱偏移量较大, 根据图像配准理论^[8], 为保证两通道进行干涉的是同一地域单元回波, 还需在 Doppler 域内根据真实方位位置将两路通道的信号频谱进行配准, 才可利用干涉技术来抑制地杂波, 检测运动目标。

线性调频 Z 变换(CZT)作为一般化的离散 Fourier 变换(DFT), 在频率选取上具有很大的灵活性, 可以在任意频段上对输入数据进行窄带的高分辨率分析。基于此, 本文采用 CZT 作为窄带滤波器组, 分别截取图2(a)两通道的阴影频段进行分析, 将 S_1, S_2 两通道的频率范围分别取为 $[f_{1,t_{y1}}, f_{2,t_{y2}}]$ 和 $[f_{2,t_{y1}}, f_{2,t_{y2}}]$, 都对同一距离门上方位位置从 $V \cdot t_{y1}$ 到 $V \cdot t_{y2}$ 之间的区域, 如此便可仅在整个辐照区频段上进行频谱分析。

假定对两通道数据分别进行 N 点 CZT, 其频率采样间隔为 $\Delta f_i = \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right) \frac{V^2}{\lambda} \Delta \tau$, 第 n 个窄带滤波器的中心频率为 $f_{i,n} = \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right) \frac{V^2}{\lambda} t_{ym}$, $\Delta \tau = \frac{t_{y2} - t_{y1}}{N}$, $t_{ym} = t_{y1} + (n-1)\Delta \tau$ 。两通道中第 n 个窄带滤波器中心频率虽不同, 但都对应同一距离门上中心位置为 $V \cdot t_{ym}$ 的方位单元, 如图2(b)。应用 CZT 进行窄带滤波能够完成从真实方位位置到 Doppler 域的映射与配准。

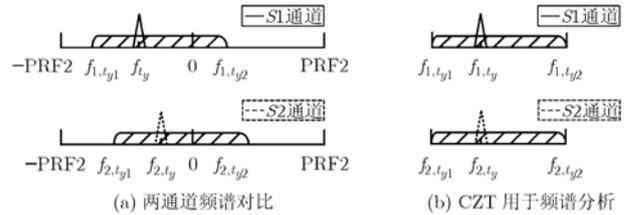


图2 方位向频谱分析示意图

4 Range-Doppler 域频谱相位补偿和运动目标检测

在 Range-Doppler 域内利用干涉技术和频谱相位补偿可以检测地面运动目标。两路通道数据经过 CZT 配准后进入 Range-Doppler 域, 将其共轭相乘, 对于 $V \cdot t_y$ 处的静止目标, 其干涉相位为 $e^{-j(C_{1,t_y} - C_{2,t_y})}$ 。根据上一节的分析, CZT 窄带滤波器同地面方位单元一一对应, 若将第 n 个窄带滤波器的相位补偿函数取作 $e^{j(C_{1,t_{ym}} - C_{2,t_{ym}})}$, 则经过相位补偿后, 静止目标的干涉相位应近似为 0。

若目标运动速度为 v , 其到卫星 S_0, S_1, S_2 的径向速度分量分别为 $v_{r,i}$, $v_{r,i} = v \cos \beta_i$, $i=0,1,2$, β_i 表示目标运动方向与卫星中心视线之间的夹角, 则经 CZT 后其频谱位置相对于静止目标存在 $-(v_{r,0} + v_{r,i})/\lambda$ 的附加偏移量, 该

偏移量在两通道内的位置差为 $\left| \frac{v_{r,0} + v_{r,1}}{\lambda \cdot \Delta f_1} - \frac{v_{r,0} + v_{r,2}}{\lambda \cdot \Delta f_2} \right|$, 要有效实现干涉, 要求该位置差对应的频谱宽度小于频率分辨宽度, 即

$$\max_i \left\{ \left| \frac{v(\cos \beta_0 + \cos \beta_1)}{\lambda \cdot \Delta f_1} - \frac{v(\cos \beta_0 + \cos \beta_2)}{\lambda \cdot \Delta f_2} \right| \cdot \Delta f_i \right\} < B \quad (6)$$

在满足式(6)条件下, 可认为经 CZT 后运动目标在两通道内的频谱其主瓣有部分重合, 设重合频谱对应的时间为 t_y' , 则其频域补偿函数应为 $e^{j(C_{1,t_y'} - C_{2,t_y'})}$, 而该运动目标频谱干涉相位的真实值是 $e^{-j(C_{1,t_y} - C_{2,t_y})}$, 经频域相位补偿后, 其干涉相位不为 0, 其值为 $\Delta \varphi \approx -\frac{4\pi(\sin \theta_1 - \sin \theta_2)}{\lambda V \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right)} v_{r,i}$,

具体推导不再赘述。下面给出回波数据经过距离向处理后的检测流程如图 3。

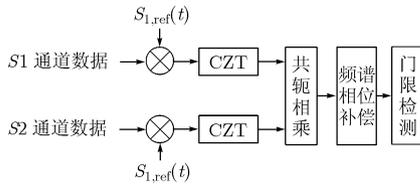


图3 基于 CZT 的 Range-Doppler 域运动目标检测流程

另外, 在对信号频谱进行相位补偿时, 若系统参数设置不合理, 将无法达到理想的补偿效果, 下面对此进行深入分析。

已知单个目标频率分辨宽度为 B , 考虑到雷达接收的是面目标回波, 对于带宽为 B 的某段频谱, 实际上是由相应位置小面元内所有散射单元的频谱叠加而成, 设小面元的方位向长度为 $V \cdot \Delta \tau$, 根据式(3), 可求得

$$\Delta \tau_i = B \left/ \left[\left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right) \frac{V^2}{\lambda} \right] \right. \quad (7)$$

其中 i 表示通道。在 Range-Doppler 域内对两路通道数据共轭相乘后, 由于小面元内各散射单元方位位置存在差异, 根据式(4), 其干涉相位也不同。设用于运动目标检测的相位门限为 ϕ_T , 只有当同一小面元内所有散射单元干涉相位的波动范围小于 ϕ_T , 经过频谱相位补偿后, 才能保证静止地物的干涉相位低于检测门限。结合式(4), 式(7), 可以推得使相位补偿有效的约束条件近似为

$$\max_i \left\{ \frac{2\pi B |\sin \theta_1 - \sin \theta_2|}{V \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_i}{r_i} \right)} \right\} < \phi_T \quad (8)$$

综上, 只有在目标速度和系统参数分别满足式(6)和式(8)时, 才可以有效检测运动目标并估计其径向速度。

5 仿真和讨论

本仿真选用 TerraSAR-X 作为主星发射信号, 3 颗小卫星接收信号, 组成 Cartwheel 构形, 具体参数设置参考文献[3], TerraSAR-X 与接收卫星星座中心的沿航迹间距为 30km, 接收卫星星座内部的最大垂直基线取临界基线的 20%, 为 6.7km。以其中两颗小卫星为例分析, 结合图 1, S_1, S_2 的基线变化历史为 $dx = 6.7 \sin(\omega t - \pi/6)$, $dy = 13.4 \cos(\omega t - \pi/6)$, $dz = 0$, ω 为卫星轨道角速度。本仿真中取相位门限为 $\pi/6$, 以 $\omega t = 0.6653\pi$ 为例, 两星基线为(6.6999, 0.0589, 0), 单位为千米, 符合式(8)条件。

图 4(a)给出此时目标频谱在两通道内的偏移量 $\Delta f_{1,2}$ 随目标方位 y 的变化关系, 按照参考文献[3]求得单个目标频率分辨宽度 $B = 1.6\text{Hz}$, 当 y 超过 0.37 km 时, 频谱偏移量已经超过频谱分辨单元宽度, 根据文献[8], 若选取配准精度为 $1/8$ 个成像单元, 则必须对频谱进行配准操作。

本仿真就单个点目标对 CZT 与传统 FFT 频谱分析方法进行了对比。图 4(b), 4(c)为 $y = -0.5$ km 处的点目标 P' 回波数据经式(3)相位补偿后的频谱分析结果。

图 4(b)中, 实线为 S_1 通道信号频谱, 其中心频率为 -333Hz , 虚线为 S_2 通道信号频谱, 其中心频率为 -335Hz 。由此可见, 经过 FFT 处理后, 目标频谱在两通道内的位置偏移量已大于信号分辨单元宽度, 若要进行干涉, 还需专门的配准操作。图 4(c)表明经 CZT 后, 目标频谱在两通道内的位置完全重合, 可以直接进行后续干涉处理。由于经过 CZT 后方位位置与频谱位置一一对应, 因此横轴的 Doppler 频率已替换为方位位置, 该图说明应用 CZT 可以在滤波同时完成频谱配准。

下面以速度大小为 20m/s 的运动目标为例进行讨论。当

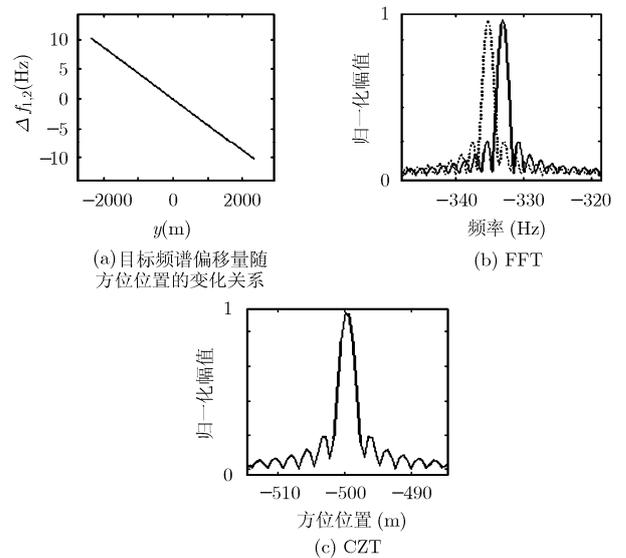


图4 点目标回波频谱分析

其运动方向与 y 轴成 171.3° 角时, 相对于 S_0, S_1, S_2 的径向速度分别为 $2.135 \text{ m/s}, 3.044 \text{ m/s}$ 和 3.057 m/s , 经 CZT 后两通道频谱偏移量约为 0.646 Hz , 小于频率分辨宽度 B , 可以进行目标的检测和速度估计。将该目标叠加信杂比为 15 dB 的背景杂波, 系统信噪比为 10 dB 时, 利用文中所提方法进行检测, 流程如图 3, 结果见图 5(a)-5(c)。

图 5(a)表示该运动目标回波经过干涉处理后的幅度谱, 目标频谱在两通道内基本重合, 对照图 4(c), 相对于静止目标位置发生偏置, 这是由目标的径向运动导致的, 同文中分析一致。图 5(b)为该目标叠加地杂波和系统噪声后的幅度谱, 可见运动目标信号被湮没在干扰谱中, 无法检测。

图 5(c)为按照文中方法进行处理后得到的干涉图, 由该图可见, 干涉相位基本集中在 0 值附近, 只有少数发生偏离, 采用幅度-相位联合检测方法^[9]可以检测到运动目标的存在, 按照第 4 节的结论, 得到目标相对于 S_1, S_2 的径向速度的估值为 3.032 m/s 和 3.067 m/s , 与实际值较为接近。

当目标运动方向与 y 轴成 68.2° 角时, 其相对于 S_1, S_2, S_3 的径向速度分别为 $13.13 \text{ m/s}, 12.76 \text{ m/s}$ 和 12.75 m/s , 经 CZT 后频谱偏移量约为 5.557 Hz , 结果见图 5(d)-5(f)。图 5(d)表明经 CZT 后目标频谱在两通道内存在较大偏移, 图 5(f)表明虽然可以检测到运动目标的存在, 但是由于频谱偏移较大, 经干涉后目标频谱将出现在分离的 Doppler 单元上, 因此无法准确估计目标速度。

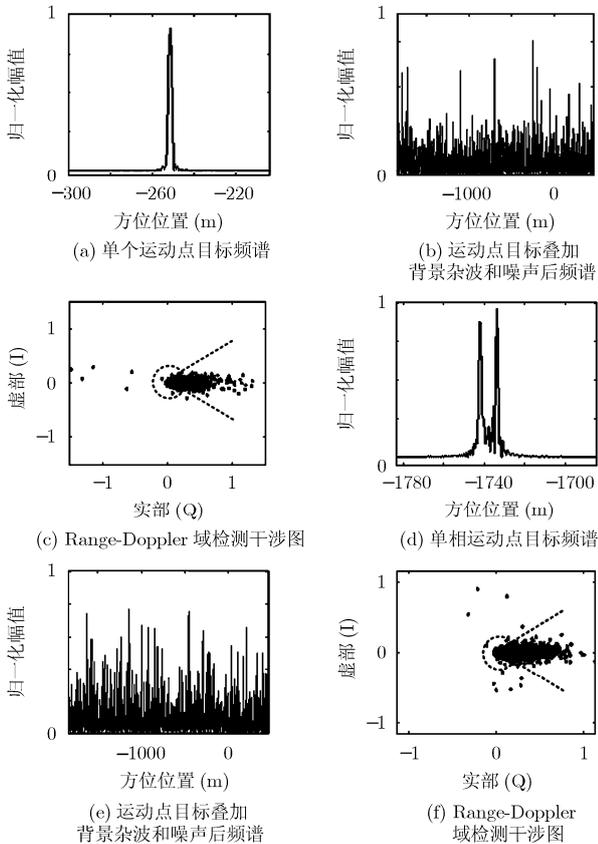


图 5 Range-Doppler 域检测结果对比

6 结束语

本文基于主辅星编队模式下的分布式卫星 SAR 系统, 提出利用 CZT 滤波在 Range-Doppler 域内检测地面运动目标, 并对其进行了仿真。该方法是对信号进行窄带滤波来完成检测任务的, 应用 CZT 对信号进行窄带滤波, 能同时完成地面方位单元频谱的配准, 避免了专门的配准操作, 降低了运算负担。

参考文献

- [1] Pascazio V, Schirinzi V, and Farina A. Moving target detection by along-track interferometry. *Int. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Sydney(AUS), 2001: 3024-3026.
- [2] Gill E and Runge H. Tight formation flying for an along-track SAR interferometer. *Acta Astronautica*, 2004, 55(3/9): 473-485.
- [3] Krieger G, Fiedler H, Mittermayer J, Papathanassiou K, and Moreira A. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR intereometry. *IEE Proc.Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(3): 87-96.
- [4] Cantalloube H, Dubois-Fernandez P, Giroux V, and Krieger G. Bistatic moving target indication, using across-track and along-track interferometry. *EURSAR*, Dresden, Germany, 2006. ID/155.
- [5] 李景文, 李春升, 周荫清. 三孔径 INSAR 动目标检测和成像. *电子学报*, 1999, 27(6): 40-43.
Li Jing-wen, Li Chun-sheng, and Zhou Yin-qing. Three-aperture INSAR moving targets detection and imaging. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 40-43.
- [6] 郑明洁. 合成孔径雷达动目标检测和成像研究. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2003.
Zheng Ming-jie. The study of moving target detection and imaging for SAR.[Doctoral dissertation], Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [7] Didier Massonnet, Jean-Claude Souyris, and Jean-Marc Gaudin. Radar processing and geometric specificity of bistatic data. *International Geoscience And Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toulouse, France, 2003, 3: 1459-1461.
- [8] 高鑫. InSAR 误差分析与图像配准、相位解缠关键技术研究. 博士后研究工作报告, 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
Gao Xin. Error analysis of InSAR and its key techniques research: image registration and phase unwrapping [Post-Doctor Research Report]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [9] Shen Chiu. A constant false alarm rate (CFAR) detector for RADARSAT-2 along-track interferometry. *Can.J.Remote Sensing*, 2005, 31(1): 73-84.

赵迎辉: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像及地面运动目标检测技术研究。

王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等。