

# 一种基于相干性本质的 InSAR 方位向预滤波方法

郭 交,李真芳,刘艳阳,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室,陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文针对合成孔径雷达干涉测量(SAR Interferometry, InSAR)数据处理中的方位向预滤波问题,提出了一种改进的 InSAR 方位向预滤波方法.首先对 InSAR 成像系统的几何模型和雷达回波相干性的本质进行了分析,在此基础上提出在方位向只有来自相同方位角空间采样位置的回波信号才具有相干性,即能够用于相干干涉处理,然后根据相干性的本质,提出了一种基于相同方位角的预滤波方法.仿真试验结果和实例分析表明,本文提出的方位向预滤波算法能够有效地保留相干性信息,提高 SAR 图像对之间的相干性.

**关键词:** 合成孔径雷达干涉测量;方位向预滤波;相干性;方位角

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 03-0417-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.001

## An Improved Method for InSAR Azimuth Prefiltering Based on Coherence Principle

GUO Jiao, LI Zhen-fang, LIU Yan-yang, BAO Zheng

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Aiming at dealing with the problem of azimuth prefiltering during the interferometric processing procedures, this paper proposed an improved method for InSAR azimuth prefiltering. Based on the theoretic analysis of the InSAR imaging geometry and the principles of coherence, this paper proposes that only the radar echoes coming from the space sampling positions with the same azimuth angles are coherent, i. e., available for interferometric process. Then an improved method for InSAR azimuth prefiltering is proposed according to the same azimuth angle extension. Finally, The computer simulation and practical examples analysis is shown to prove that the proposed algorithm can improve the coherence between complex SAR images while preserving the coherent information effectively.

**Key words:** SAR interferometry(InSAR); azimuth prefiltering; coherence; azimuth angle

### 1 引言

合成孔径雷达干涉测量(SAR Interferometry, InSAR)是获取地面数字高程图(Digital Elevation Model, DEM)的重要手段之一<sup>[1,2]</sup>.它以不同下视角观测同一地区获得两幅或者多幅 SAR 图像,通过对这些 SAR 图像的相位做干涉处理,获得观测场景的地形信息.不同于传统的 SAR 成像,InSAR 干涉处理的前提是获得的 SAR 图像之间必须具有高相干性,而且相干性直接决定了干涉测高的性能<sup>[3]</sup>.然而,实际中多种去相干因素<sup>[4]</sup>会导致 SAR 图像之间的相干性降低.针对由空间基线引入的去相关因素,通过对回波数据对进行距离向和方位向预滤波处

理,可以有效提高 SAR 图像之间的相干性<sup>[5~8]</sup>.

距离向预滤波和方位向预滤波方法已经被广泛的研究<sup>[5~8]</sup>.众所周知,在距离向预滤波方法<sup>[6]</sup>中,由于下视角存在差异,两副天线接收到的信号对应于地面反射谱的不同谱段,导致两个回波的波数谱存在偏移,而只有重叠的回波波数谱部分才能用于干涉处理,因此需要滤除掉非重叠的回波波数谱,达到提高相干性的目的.在方位向,传统的方位向预滤波方法<sup>[7,8]</sup>认为:InSAR 系统获得的雷达原始回波对的方位多普勒谱存在偏移,会导致回波的相干性下降,因为只有具有相同多普勒谱的回波才具有相干性,而非重叠的多普勒谱段部分则是非相干的,是对相干性的干扰信息,相当于噪声,必然会导

致相干性的下降.因此,传统的方位向预滤波方法为截取相同的多普勒谱.通常的实现方法<sup>[7]</sup>为:根据单个回波数据的多普勒中心频率和多普勒带宽确定出重叠的多普勒谱段,然后滤除掉非重叠部分,再在重叠的多普勒谱段上构造方位压缩函数进行 SAR 成像处理,从而提高相干性.

本文的贡献是通过分析 InSAR 成像系统几何模型的分析,揭示了雷达回波具有相干性的本质,针对方位向预滤波处理,提出了在方位向只有相同方位角空间采样位置接收到的雷达回波才具有相干性,能够用于后续的相干干涉处理,并在此基础上提出一种基于方位角相同的预滤波方法.

## 2 算法原理

典型的 SAR 成像几何模型<sup>[9]</sup>如图 1 所示,其中,  $X$  轴为雷达平台速度方向(沿航向方向),  $Z$  轴背向地球中心,  $Y$  轴垂直于  $XOZ$  平面,构成左手坐标系,假定雷达工作在右视状态,下标  $i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 用来分别表示两个或者多个用于干涉的雷达系统,  $\phi_i$  为雷达到地面目标的视线与速度方向的夹角称为锥角;  $\theta_i$  为雷达到地面目标的视线在地面的投影与  $Y$  方向的夹角称为方位角;  $\varphi_i$  为雷达到地面目标的视线在目标处与  $Z$  轴

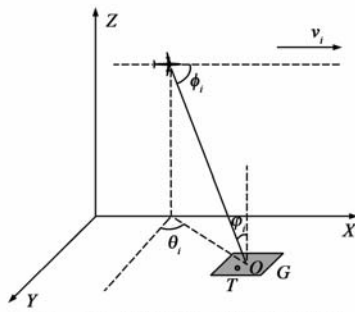


图1 SAR成像的几何模型示意图

方向的夹角称为此目标的入射角.

为了分析雷达回波满足相干性的本质,我们选取了一小块地面场景  $G$ , 其几何中心点为  $O$  点, 假定其坐标值为  $(0, 0)$ . 为了分析的简化, 我们作如下假设: (1) 地面场景  $G$  的坡度为零; (2) 两个雷达分别工作于自发自收体制(对一发双收体制的工作模式, 如果基线不是很长, 根据等效相位中心原理, 通过补偿一个常数相位可以等效为自发自收模式); (3) 地面场景  $G$  由均匀分布且不相干的散射中心组成. 从图 1 中的几何关系容易得到, 地面目标点的锥角  $\phi_i$ 、方位角  $\theta_i$  和入射角  $\varphi_i$  满足如下关系<sup>[9]</sup>:

$$\cos\phi_i = \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_i \quad (1)$$

我们分析地面单元  $G$  的回波相干性的条件, 对于此地面单元内的任一点  $T$ ,  $T$  点相对于中心  $O$  点的坐标为  $(x, y)$ .

由图 1 中的几何关系可以得到,  $T$  点到两个雷达天线的斜距可以分别近似表达为如下两式:

$$r_1(x, y) = r_{01} + x \cdot \sin\theta_1 \sin\varphi_1 + y \cdot \cos\theta_1 \sin\varphi_1 \quad (2)$$

$$r_2(x, y) = r_{02} + x \cdot \sin\theta_2 \sin\varphi_2 + y \cdot \cos\theta_2 \sin\varphi_2 \quad (3)$$

其中,  $r_{01}$  和  $r_{02}$  分别为两个雷达天线相位中心到中心点  $O$  的瞬时斜距. 此地面单元的总回波信号为对此单元  $G$  内的所有点目标回波求和, 则两副雷达接收到的地面场景的回波信号分别为:

$$S_1 = \iint_{(x,y) \in G} W(x, y) e^{-j\frac{4\pi f}{c} r_1(x, y)} \sigma(x, y) dx dy \quad (4)$$

$$S_2 = \iint_{(x,y) \in G} W(x, y) e^{-j\frac{4\pi f}{c} r_2(x, y)} \sigma(x, y) dx dy \quad (5)$$

其中  $W(x, y)$  为 SAR 系统的点目标响应函数,  $f$  为雷达发射信号频率,  $c$  为光速,  $\sigma(x, y)$  为点  $(x, y)$  的后向散射系数. 回波信号  $S_1$  和  $S_2$  的共轭相乘形成干涉图, 通过公式推导(详细推导过程请参见文献[10])可以得到回波对  $S_1$  和  $S_2$  的归一化相干系数为:

$$\rho = \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_1 S_1^* \rangle \langle S_2 S_2^* \rangle}} = \frac{\left| \iint_{(x,y) \in G} |W(x, y)|^2 e^{-j\left[\frac{4\pi f}{c} r_1(x_1, y_1) - \frac{4\pi f}{c} r_2(x_2, y_2)\right]} dx dy \right|}{\iint_{(x,y) \in G} |W(x, y)|^2 dx dy} \quad (6)$$

由斜距表达式(2)和(3)可知, 上式中的指数项为积分变量  $x$  和  $y$  的二元一次函数. 设变量  $u$  和  $v$  分别为  $x$  和  $y$  的一次项系数, 则相干系数的表达式(6)可以重写为:

$$\rho = \frac{\left| \iint_{(x,y) \in G} |W(x, y)|^2 e^{-j\left[\frac{4\pi f}{c}(r_{01} - r_{02}) + ux + vy\right]} dx dy \right|}{\iint_{(x,y) \in G} |W(x, y)|^2 dx dy} \quad (7)$$

则由上式可以得到:

$$u = \frac{4\pi f}{c} \sin\theta_1 \sin\varphi_1 - \frac{4\pi f}{c} \sin\theta_2 \sin\varphi_2 \quad (8)$$

$$v = \frac{4\pi f}{c} \cos\theta_1 \sin\varphi_1 - \frac{4\pi f}{c} \cos\theta_2 \sin\varphi_2 \quad (9)$$

典型的雷达模型, 其点目标响应近似为  $W(x, y) = \text{sinc}\left(\frac{x}{\rho_x}\right) \text{sinc}\left(\frac{y}{\rho_y}\right)$ , 其中  $\rho_x$  和  $\rho_y$  分别为 SAR 系统的方位向和距离向分辨率,  $\text{sinc}(x)$  函数为  $\frac{\sin\pi x}{\pi x}$ . 利用傅里叶变换的性质, 可以计算出相干系数<sup>[10]</sup>为:

$$\rho = \left(1 - \frac{|u| \rho_x}{2\pi}\right) \cdot \left(1 - \frac{|v| \rho_y}{2\pi}\right) \quad (10)$$

从式(10)的相干系数的表达式中可以看出, 只有当  $u = 0$  且  $v = 0$ , 才能使  $\rho = 1$ , 即满足完全相干条件.

在式(8)和式(9)中,  $f$  为雷达系统的发射信号频

率,通常情况下,雷达系统的发射信号为具有一定带宽的线性调频信号,假定载频为  $f_0$ ,带宽为  $B$ ,则发射的线性调频信号的频率范围为  $\left[f_0 - \frac{B}{2}, f_0 + \frac{B}{2}\right]$ ,根据 InSAR 系统的几何关系,容易得到两个雷达回波波数谱分别为  $k_1 = \frac{4\pi f_1}{c} \sin \varphi_1$ ,  $k_2 = \frac{4\pi f_2}{c} \sin \varphi_2$ ,即  $\frac{4\pi f}{c}$  分别在两雷达成像平面上的投影.由式(8)和式(9)通过推导可以得到  $u = 0$  且  $v = 0$  的充分必要条件为:

$$k_1 = k_2 \quad (11)$$

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (12)$$

其中,式(11)与下式等效

$$\frac{4\pi f_1}{c} \sin \varphi_1 - \frac{4\pi f_2}{c} \sin \varphi_2 = 0 \quad (13)$$

其中  $f_1$  和  $f_2$  分别为两个雷达信号的频率.式(11)和式(12)揭示了 InSAR 系统中几何去相干的本质:在距离向,由于下视角存在微小差异(即  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ ),相同的发射信号经过地面反射的回波波数谱存在一定差异(即  $k_1 \neq k_2$ ),导致相干性降低;在方位向,由于雷达回波的空间采样位置对应的方位角不同(即  $\theta_1 \neq \theta_2$ )导致相干性降低.因此,在 InSAR 数据处理中,我们可以通过距离向和方位向预滤波处理保留相干信息,滤除掉非相干信息,从而提高 SAR 图像之间的相干性,而距离向和方位向预滤波的目的就是使式(11)和式(12)在整个成像处理所用的回波数据中保持成立.

## 2.1 距离向预滤波<sup>[5,6]</sup>

由于 InSAR 系统本身固有的垂直基线(即实际基线沿垂直航迹平面的投影)必然会导致下视角不同,即  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ ,导致两幅雷达的成像斜平面不同,此时,地面发射的雷达回波波数谱就会产生偏移,导致去相干的产生,因此,需要进行距离向预滤波保留相同的回波波数谱部分,从而提高相干性,如图 2 所示.

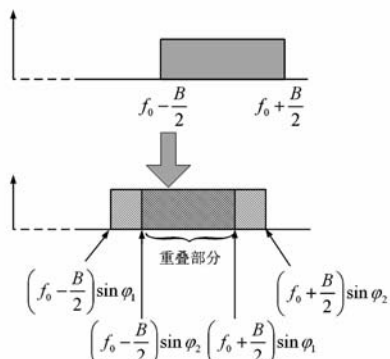


图2 距离向预滤波示意图

## 2.2 方位向预滤波

通过以上对回波相干性本质的分析,可以得出结论:方位向预滤波的目的是使得方位角相等,只有来自

相同方位角空间采样位置的雷达回波才能用于相干干涉处理,即满足相干性本质.需要强调的是,相同的方位角范围与相同的多普勒谱段并非一一对应,因为多普勒频率不仅与方位角有关,而且与雷达平台的运动速度和锥角有关,在 InSAR 系统中,两个雷达天线的下视角和速度的差异必然会导致方位多普勒谱与方位角并非完全一一对应,换句话说,相同的方位角对应于不同的多普勒频率,尤其在速度差异比较大的情况下.

## 3 算法实现步骤

与传统方位预滤波方法截取公共的方位多普勒谱相比较,我们提出了一种基于相干性本质的方位向预滤波方法:对两次航过录取的同一地面场景的反射回波数据分别计算对应的方位角区间,然后截取相同方位角区间内的回波数据进行方位压缩,从而完成方位向预滤波处理.具体实现步骤如下:

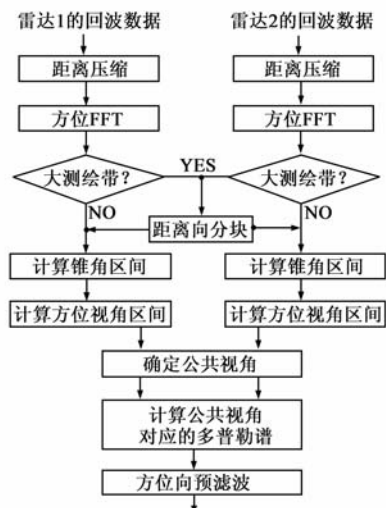


图3 改进的InSAR方位向预滤波算法流程图

**Step 1** 对原始回波对分别进行方位向 FFT 变换到方位多普勒域.

**Step 2** 根据多普勒频率与锥角的关系计算得到锥角范围.

众所周知,多普勒频率与锥角的对应关系为

$$f_{i, \text{Doppler}} = \frac{2v_i}{\lambda} \cos \phi_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (14)$$

其中  $f_{i, \text{Doppler}}$  为第  $i$  次航过的多普勒频率值,  $v_i$  为第  $i$  次航过的雷达平台速度,  $\lambda$  为发射信号的载波波长.

**Step 3** 根据式(1)由锥角区间求解出对应的方位角范围.根据 SAR 成像的几何模型,机载情况下,入射角近似等于雷达下视角(即雷达视线方向与  $-Z$  轴方向的夹角);星载情况下,入射角近似等于雷达下视角与地心角之和.

**Step 4** 确定公共的方位向视角范围,即从 Step 1

→ Step 3 反向推算,确定公共的方位角区间对应的多普勒谱段.

联立式(1)和式(14),可得

$$f_{i, \text{Doppler}} = \frac{2v_i}{\lambda} \sin\theta_i \cdot \sin\varphi_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (15)$$

由上式可以看出,相同的方位角采样角对应的两

副雷达的瞬时多普勒频率之比  $\beta = \frac{v_1 \cdot \sin\varphi_1}{v_2 \cdot \sin\varphi_2}$ ,可以看出,只有忽略了速度和下视角的差异,才能满足条件  $\beta = 1$ ,此时,方位角与多普勒频率一一对应.

**Step 5** 分别在 Step 4 确定出的各自多普勒谱段上构造方位压缩函数进行方位压缩.

按照上述的 Step 1 → Step 5 五步操作,即完成方位向预滤波处理,操作流程如图 3 所示.需要指出的是,如果测绘带宽比较大,上述操作需要在回波距离压缩后在距离向进行分块处理.

## 4 仿真实验

为了验证本文算法的有效性,我们设置了如图 4 所示的地面场景,其地物向后散射系数来源于某真实 SAR 图像.为了说明每个分辨单元都是一个小的分布型面目标,在每个分辨单元内布置了 16 个散射点,所有这些散射点的后向散射系数独立同分布.我们通过回波仿真产生机载重复航过 InSAR 系统的原始雷达回波,假定雷达工作于正侧视状态,两次航过的雷达平台速度分别为 150m/s 和 200m/s,其它雷达参数均相同,如表 1 所示.

表 1 仿真参数

平台高度	入射角	波段	方位分辨率	距离分辨率
4000m	45°	X 波段	1m	3m

我们对两次航过的回波数据分别经过传统的方位向预滤波(即截取重叠的方位向多普勒谱)和文中所提出的方位向预滤波方法(即截取公共方位角对应的多普勒谱),然后通过相同的 SAR 成像处理和 SAR 图像配准

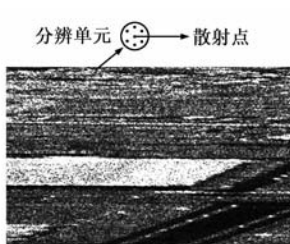


图 4 仿真输入的地面场景

步骤,计算得到 SAR 图像对之间的相干系数统计图,如图 5 所示.需要说明的是,由于速度的差异导致方位角采样间隔不同,因此我们对成像以后的数据进行方位重采样以保证 SAR 图像之间具有相同的方位角采样率.

我们利用相干系数来定量评价方位向预滤波性能.图 5 为相干系数的统计直方图,与截取公共多普勒

谱的传统预滤波方法相比较,截取公共方位角进行预滤波得到的相干系数直方图,明显后移,从而提高了整幅图像的相干系数.因此,我们可以得出结论:本文所提出的方法在保留相干性信息的同时,能够很大程度上改善方位向预滤波的性能.

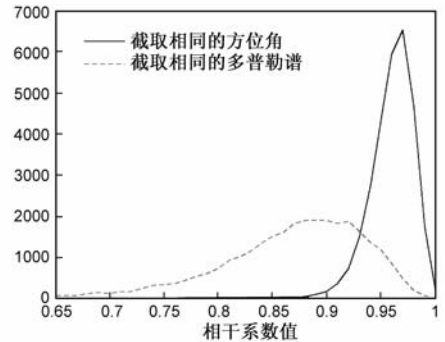


图 5 相干系数统计直方图

需要指出的是,此情况在斜视角比较大时更加严重.例如,在机载重复航过 InSAR 系统中,方位向天线尺寸为 0.5m,两次航过的速度分别为 120m/s 和 130m/s,若雷达处于正侧视观测,忽略下视角的差异,则两次航过对应的多普勒带宽谱分别为  $[-240 \ 240]$  Hz 和  $[-260 \ 260]$  Hz.如果经过传统的方位向预滤波处理,两次航过回波数据的多普勒谱都为  $[-240 \ 240]$  Hz,而根据文中的算法,经过改进的方位向预滤波算法(忽略下视角的差异)两次航过数据的多普勒谱并没有发生变化,依然分别为  $[-240 \ 240]$  Hz 和  $[-260 \ 260]$  Hz,也就是说经过传统的预滤波方法反而滤除掉了具有相干性的回波,导致了相干性的下降,同时由于截掉了有用的多普勒谱段,因此也造成了分辨率的降低.若雷达工作于斜视模式(假定斜视角都为 45°),其它参数与正侧视相同,则两次航过对应的多普勒带宽谱分别为  $[532 \ 600]$  Hz 和  $[576 \ 650]$  Hz,如果截取重叠的多普勒谱,则两次回波对应的多普勒谱都为  $[576 \ 600]$  Hz,而按照截取重叠的方位角,两次回波的多普勒谱依然分别为  $[532 \ 600]$  Hz 和  $[576 \ 650]$  Hz.正侧视和斜视情况下分别去

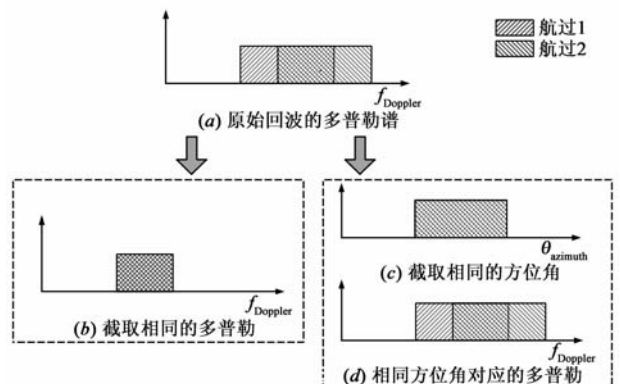


图 6 预滤波方法比较示意图

除的相干多普勒谱为 40Hz 和 94Hz,可以看出在斜视情况下,两种不同的预滤波方法得到的回波差异更大.图 6 中所示为两种方法的比较,左侧传统方法截取相同的多普勒谱,右侧为文中的方法截取相同的方位角范围,可以看出,经过文中的方法处理获得的回波数据之间的多普勒谱并不相同,但是由于方位角相等,因此满足相干性原理,能够用于相干干涉处理.

## 5 结论

获得高相干性的 SAR 复图像对是 InSAR 干涉测量的前提.本文针对 InSAR 系统中的几何去相关因素,分析了 InSAR 成像系统的几何模型,并通过公式推导揭示雷达回波具有相干性的本质:在距离向,由于下视角不相等,发射信号经过地面反射的回波波数谱存在一定差异,导致相干性降低;在方位向,方位角的不同导致相干性降低.并且基于雷达回波相干性的本质提出一种基于相同方位角的 InSAR 方位向预滤波方法:对 InSAR 系统中每次航过的回波数据截取来自相同方位角空间采样位置的回波数据进行方位压缩处理,从而达到提高 SAR 复图像对之间相干性的目的.最后通过仿真实验和实例分析验证了该方法的有效性和必要性.

## 参考文献

- [1] Rosen P, Hensley S, Joughin I, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333 - 382.
- [2] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Inv Probl, 1998, 14(1): R1 - R54.
- [3] Lee J S, Hoppel K W, Mango S A, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery[J]. IEEE Trans Geosci. Remote Sens, 1994, 32(5): 1017 - 1028.
- [4] Touzi R, Lopes A, Bruniquel J, et al. Coherence estimation for SAR imagery[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1999, 37(1): 135 - 149.
- [5] Prati C, Rocca F. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1993, 29(1): 135 - 144.

- [6] Gatelli F, Guamieri M A, Parizzi F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1994, 32(4): 855 - 865.
- [7] Schwabisch M, Geudtner D. Improvement of phase and coherence map quality using azimuth prefiltering: examples from ERS-1 and X-SAR[A]. Proc IGARSS[C]. Germany: IEEE, 1995. 205 - 207.
- [8] Hong S H, Won J S. Coherence improvement of cross-interferometric pair by a block azimuth filtering[A]. Proc IGARSS[C]. Germany: IEEE, 2006. 1248 - 1250.
- [9] Li Z, Bao Z, Wang H, et al. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2006, 42(2): 436 - 452.
- [10] Zebker H A, Madsen S N. Decorrelation in interferometric radar echoes[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1992, 30(5): 950 - 959.

## 作者简介



**郭 交** 男,1984 年出生于陕西省西安市,现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室硕博连读研究生,主要研究方向:干涉合成孔径雷达成像.  
E-mail: jiao.g@163.com



**李真芳** 男,1977 年出生于山东省寿光市,现为西安电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向:合成孔径雷达成像(SAR)和地面活动目标检测(GMTI).

**刘艳阳** 男,1987 年生,博士生,主要研究方向为干涉合成孔径雷达成像(InSAR).

**保 铮** 男,1927 年出生于江苏省南通市,现为中国科学院院士,中国电子学会会士,研究领域为雷达信号处理及现代雷达信号处理等.