

# 基于频谱偏移估计的分布式星载 SAR 提高距离向分辨率的数据处理方法

徐华平, 周荫清, 李春升

(北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

**摘 要:** 分布式星载 SAR 利用不同视角回波信号之间地面散射频谱不同的特性来提高 SAR 图像的距离向分辨率. 其数据处理的关键就是如何将这不同频段的信号相结合, 得到具有更宽频谱的高分辨率图像. 本文提出了一种基于频谱偏移估计的分布式星载 SAR 提高距离向 SAR 图像分辨率的数据处理方法. 该方法的主要思想是在 SAR 复图像的基础上, 通过精确的估计, 得到 SAR 复图像间的距离向频谱偏移量, 并根据该偏移量, 在频域进行距离向频谱偏移补偿后将图像相加. 建立了分布式星载 SAR 单视复图像的信号模型, 推导了基于频谱偏移估计提高 SAR 图像距离向分辨率的原理公式, 给出了基于频谱偏移估计提高距离向分辨率的具体数据处理步骤. 最后采用仿真数据验证了理论推导的正确性和数据处理方法的有效性.

**关键词:** 分布式; SAR; 距离向分辨率; 数据处理; 算法

**中图分类号:** TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1790-05

## An Algorithm Based on Spectrum Shift Estimation For Improving Range Resolution Using Distributed Spaceborne Interferometric SAR

XU Hua-ping, ZHOU Yin-qing, LI Chun-sheng

(Dept of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Distributed spaceborne SAR can produce SAR images with different scattering spectrum. The combination of these SAR images was used to improve the range resolution in final image product. The key point in its data processing was how to correctly join these different spectrums to a wider range spectrum. A new algorithm based on spectrum shift estimation for improving range resolution was proposed to process distributed spaceborne SAR data. The algorithm firstly estimated the spectrum shift between SAR complex images acquired by small satellites. Then the spectrum shift was compensated to these complex images in frequency field. Finally the compensated SAR images were added to form final image with improved range resolution. According to SAR complex image model, the new algorithm was derived. The steps to implement the algorithm mainly included image registration, spectrum shift estimation, spectrum shift compensation and image addition and every step was presented in detail. FFT were used in the algorithm to reduce its processing time. In last, computer simulation was employed to test the new algorithm.

**Key words:** distributed; SAR; range resolution; data processing; algorithm

### 1 引言

分布式小卫星是近几年提出来的一种利用卫星实现空间任务的新方法, 它采用多颗小卫星协同工作完成传统单颗卫星能够或者不能够完成的任务. 分布式星载 SAR 采用分布式小卫星协同工作, 并利用小卫星接收到的 SAR 信号之间的相干性或者相关性进行数据处理, 实现提高分辨率、三维地形图成像和动目标成像等应用.

提高 SAR 图像距离向分辨率是分布式星载 SAR 的一个重要应用. 单颗星载 SAR 是通过增加信号带宽来提高距离向

分辨率, 这样会引起距离采样率增大, 在卫星数传系统传输速率有限时将减小测绘带宽. 1993 年, Prati 和 Rocca<sup>[1]</sup>首次提出了结合多幅不同视角 SAR 图像可以提高距离向分辨率的概念. 之后, Massonnet<sup>[2]</sup>将这一概念应用于他所提出的干涉转轮 (Interferometric Cartwheel) 中以提高距离向分辨率. 分布式干涉 SAR 与干涉转轮提高距离分辨率的机理相同, 都是通过联合距离向具有一定基线的多颗小卫星获得的 SAR 复图像来提高距离向分辨率, 在 SAR 系统参数基本不改变的情况下实现距离向分辨率的提高.

Prati 和 Rocca<sup>[1]</sup>采用理想的特殊干涉 SAR 空间基线, 从

SAR 原始回波信号出发,推导了多幅 SAR 图像结合提高距离向分辨率的原理公式,并且在推导中进行了一定的假设,使得结论具有一定的局限性.本文则采用分布式星载 SAR 的单视复图像信号模型,推导了更切合实际的一般空间基线下多幅 SAR 图像结合提高距离向分辨率的数学公式.

关于分布式星载 SAR 提高距离向分辨率的数据处理,目前所能查到的资料只有 Massonet<sup>[2]</sup> 给出简单介绍的 PHASEMAP 方法.该方法将图像采样到 DTM 坐标系内,需要观测区域的先验知识;采用时域插值,并且进行两次相位补偿,运算量大,处理比较复杂.本文提出一种基于频谱偏移估计的分布式星载 SAR 提高距离向分辨率的数据处理方法.它主要是根据估计得到的 SAR 复图像之间的频谱偏移量,通过在频域进行一次频谱平移来实现相位补偿,处理简单;利用 FFT 技术在频域实现插值,提高了运算速度.

### 2 分布式星载 SAR 单视复图像信号模型

根据 Li<sup>[3]</sup> 给出的星载干涉 SAR 单视复图像信号模型,建立一发多收的分布式星载 SAR 单视复图像信号模型.第  $k$  颗卫星获得的 SAR 单视复图像可以表示为

$$s_k^1(x_k, r_k) = \int \int w(x_k - x_k, r - r_k) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_k + r_s)\right\} \cdot w(x_k - x_k, r - r_k) dx_k dr_k \quad (1)$$

式中,  $x_k, r_k$  分别表示第  $k$  颗卫星的方位向和斜距向坐标,为雷达波长,  $c$  为光速,  $(\cdot)$  为地面点的后向散射系数,  $r_s$  表示发射信号卫星到地面目标的距离,  $w(\cdot)$  表示天线方向性图和成像处理中加权的综合作用.一般在不考虑加权时,有

$$w(x, r) = \text{sinc}\left(\frac{x}{R_a}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{r}{R_r}\right) \quad (2)$$

其中,  $R_a$  和  $R_r$  分别为方位向和斜距向的空间分辨率.

对于多发多收的分布式星载 SAR,其 SAR 单视复图像信号模型与一发多收的基本相同,不同的只是将式(1)中的第一个相位项修改为  $\exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_k\right\}$ .本文后面的讨论主要是针对一发多收的情况,多发多收系统的具体分析与之相类似.

不考虑加权处理时,式(1)也可以写为

$$s_k^1(x_k, r_k) = \text{sinc}\left(\frac{x_k}{R_a}\right) \otimes_{x_k} \text{sinc}\left(\frac{r_k}{R_r}\right) \otimes_{r_k} \left\{ \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_k + r_s)\right\} \right\} \quad (3)$$

这里假设每颗小卫星 SAR 系统的空间分辨率都相同,这与实际情况是吻合的,实际设计中常采取每颗小卫星 SAR 参数相同来节省开发周期和费用.

### 3 基于频谱偏移估计方法的原理推导

距离向具有一定基线关系的小卫星照射地面目标的视角不同,因而可以得到同一地面目标的不同频谱.结合不同卫星得到的 SAR 图像就可以获得更宽的目标频谱,因此能够得到更高的距离向空间分辨率.下面以两颗卫星为例,推导基于频谱偏移估计方法的原理.以此类推,可以得到多颗卫星的推导过程.

图 1 给出了分布式星载 SAR 中两颗卫星之间的空间几何关系.它反映了更一般的空间基线情况.图中  $x$  为卫星飞行方向,即方位向,  $z$  是背离地心方向,  $y$  垂直于卫星轨道平面,并与  $x, z$  构成右手坐标系.  $Sat_1$  为第一颗卫星,  $Sat_2$  为第二颗卫星,  $Sat_2'$  为  $Sat_2$  在垂直于轨道平面上的投影.  $H$  为轨道高度,  $h$  是地面目标高度.  $B_x, B_y, B_z$  分别为基线  $B$  在  $x, y, z$  三个坐标轴上的分量.  $B_y$  为垂直于视线方向的空间基线分量,由图 1 得

$$B_y = B_x \cos \theta_1 + B_z \sin \theta_1 \quad (4)$$

式中,  $\theta_1 = (\theta_1 + \theta_2)/2$ ,  $\theta_1, \theta_2$  分别为  $Sat_1, Sat_2$  的雷达视角.

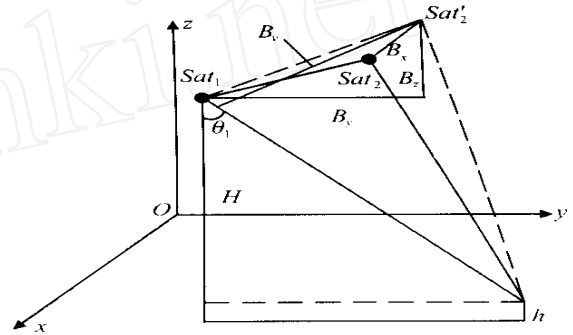


图 1 分布式干涉 SAR 中两颗卫星的空间几何关系

根据式(3),图 1 中两颗卫星获得的 SAR 单视复图像 1 和 2 分别为

$$s_1^1(x_1, r_1) = \text{sinc}\left(\frac{x_1}{R_a}\right) \text{sinc}\left(\frac{r_1}{R_r}\right) \otimes_{x_1, r_1} \left\{ (x_1, r_1) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 + r_s)\right\} \right\} \\ = \text{sinc}\left(\frac{x_1}{R_a}\right) \otimes_{x_1} \text{sinc}\left(\frac{r_1}{R_r}\right) \otimes_{r_1} \left\{ (x_1, r_1) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 + r_s)\right\} \right\} \quad (5)$$

$$s_2^1(x_2, r_2) = \text{sinc}\left(\frac{x_2}{R_a}\right) \text{sinc}\left(\frac{r_2}{R_r}\right) \otimes_{x_2, r_2} \left\{ (x_2, r_2) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 + r_s)\right\} \right\} \\ = \text{sinc}\left(\frac{x_2}{R_a}\right) \otimes_{x_2} \text{sinc}\left(\frac{r_2}{R_r}\right) \otimes_{r_2} \left\{ (x_2, r_2) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 + r_s)\right\} \right\} \quad (6)$$

由于两颗卫星的天线视角不同,两幅 SAR 图像的像素并不一一对应,像素单元的大小也不完全相同.这里以图像 1 为基准,配准图像 2 得

$$s_2^2(x_1, r_1) = \text{sinc}\left(\frac{x_1}{R_a}\right) \otimes_{x_1} \text{sinc}\left(\frac{r_1}{R_r}\right) \otimes_{r_1} \left\{ (x_1, r_1) \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 + r_s)\right\} \right\} \quad (7)$$

式(5)和式(7)分别进行距离向傅里叶变换,即对  $r_1$  进行傅里叶变换  $\left\{ t_1 = \frac{r_1 + r_s}{c} \right\}$ , 得

$$S_1(x_1, f_r) = \text{sinc}\left(\frac{x_1}{R_a}\right) \otimes_{x_1} \left\{ \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_{Wf}}\right) (x_1, f_r + f_0) \right\} \quad (8)$$

$$S_2(x_1, f_r) = \text{sinc}\left(\frac{x_1}{R_a}\right) \otimes_{x_1} \left\{ \text{rect}\left(\frac{f_r}{B_{Wf}}\right) (x_1, f_r + f_0 - f) \right\} \quad (9)$$

其中,  $f_0$  为雷达系统载频,  $B_W$  为雷达系统带宽.  $S_i(\cdot)$  为  $s_i(\cdot)$  的距离向傅里叶变换,  $i = 1, 2$ .  $(\cdot)$  为  $(\cdot)$  的傅里叶变换.  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数, 即有

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

根据图 1 给出的几何关系可以知道<sup>[4]</sup>

$$f = \frac{B_W}{r \tan \theta} f_0 \quad (11)$$

分别对  $S_1(\cdot)$  和  $S_2(\cdot)$  进行频谱平移. 将  $S_1(\cdot)$  向右移动

$\frac{f}{2}$ ,  $S_2(\cdot)$  向左移动  $\frac{f}{2}$ , 则式(8)、(9)分别变为

$$S_1 \left( x_1, f_r - \frac{f}{2} \right) = \text{sinc} \left( \frac{x_1}{R_a} \right) \odot_{x_1} \left[ \text{rect} \left( \frac{f_r - (f/2)}{B_W} \right) \cdot \left( x_1, f_r + f_0 - \frac{f}{2} \right) \right] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_2 \left( x_1, f_r + \frac{f}{2} \right) &= \text{sinc} \left( \frac{x_1}{R_a} \right) \odot_{x_1} \left[ \text{rect} \left( \frac{f_r + (f/2)}{B_W} \right) \cdot \left( x_1, f_r + f_0 - \frac{f}{2} \right) \right] \\ &= \text{sinc} \left( \frac{x_1}{R_a} \right) \odot_{x_1} \left[ \text{rect} \left( \frac{f_r + (f/2)}{B_W} \right) \cdot \left( x_1, f_r + f_0 - \frac{f}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式(12)和(13)相加, 有

$$\begin{aligned} S(x_1, f_r) &= S_1(x_1, f_r - (f/2)) + S_2(x_1, f_r + (f/2)) \\ &= \text{sinc} \left( \frac{x_1}{R_a} \right) \odot_{x_1} \left[ \left( \text{rect} \left( \frac{f_r + (f/2)}{B_W} \right) + \text{rect} \left( \frac{f_r - (f/2)}{B_W} \right) \right) \cdot \left( x_1, f_r + f_0 - \frac{f}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)去掉因子  $\text{rect} \left( \frac{f_r + (f/2)}{B_W} \right) + \text{rect} \left( \frac{f_r - (f/2)}{B_W} \right)$  后, 进行傅立叶反变换得

$$S(x_1, r_1) = \text{sinc} \left( \frac{x_1}{R_a} \right) \cdot \text{sinc} \left( \frac{r_1}{R_r} \right) \odot_{x_1, r_1} \left\{ (x_1, r_1) \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 + r_2) \right] \right\} \quad (15)$$

其中,  $R_r$  为复图像 1 与 2 结合后得到的图像的斜距向分辨率, 且有

$$R_r = \frac{c}{2(B_W + f)} = \frac{R_r}{1 + (f/B_W)} \quad (16)$$

可以看出, 两幅单视 SAR 复图像结合后, 图像的距离向分辨率提高了  $1 + (f/B_W)$  倍.

## 4 基于频谱偏移估计数据处理方法的实现

根据前面对基于频谱偏移估计方法提高距离向分辨率的原理研究, 本文提出一种基于频谱偏移估计提高距离向分辨率的数据处理方法, 它主要包括: 复图像配准、频谱偏移估计、复图像频谱平移和复图像相加四个步骤.

### 4.1 复图像配准

提高距离向分辨率要求两幅单视复图像上的像素点必须

一一对应. 实际上由于两部天线与地面点的位置关系不同, 因而两幅图像上的像素点并不完全对应, 需要进行精确配准.

可以看出, 这里的复图像配准与干涉 SAR 成像中的图像配准基本上相同, 因此可以借鉴干涉 SAR 成像处理中已经发展得比较成熟的图像配准技术. 本文采用相关系数最大的复图像配准方法<sup>[5]</sup>. 相关系数是反映两幅 SAR 复图像之间相关程度的性能指标, 它随着图像配准精度的提高而增大. 因此可以采用相关系数最大的方法来配准图像. 相关系数最大法的配准精度可以达到亚像素量级.

### 4.2 频谱偏移估计

由第 3 部分的分析可以看出, 提高图像分辨率的关键就是确定两幅复图像的频谱偏移量  $f$ . 采用式(11)计算  $f$  需要知道精确的基线信息, 但通常由星历参数求得的基线精度较差, 要想得到精确的基线值, 还需进行基线估计, 因此比较麻烦. 下面给出一种通过估计干涉条纹的瞬时频率来估计  $f$  的方法.

根据式(5)~(9), 有

$$\begin{aligned} f &= \frac{d}{dt} \left[ 2 \left( (r_1 + r_s) - (r_2 + r_s) \right) \right] / 2 \\ &= - \frac{d}{dt} (r_1 - r_2) / 2 \end{aligned} \quad (17)$$

其中  $r_1 = -2(r_1 + r_s)$ ,  $r_2 = -2(r_2 + r_s)$ , 分别为复图像 1 和 2 的相位. 可以看出,  $f$  也是两幅复图像相干后, 干涉复图像在斜距向的瞬时频率. 所以通过估计干涉图像的斜距向瞬时频率就可以确定  $f$ .

最大似然法<sup>[6]</sup>是估计干涉图像瞬时频率的一个比较精确的方法. 它是通过检测干涉复图像当前点处频谱最高峰来确定当前点的瞬时频率. 具体实现方法是: 以像素点  $(m, n)$  为中心, 沿斜距向取长度为  $E$  的序列, 对该序列进行离散傅立叶变换得到其频谱, 最大谱峰处的频率值即为  $(m, n)$  处的频率. 以该频率估计值为初始值, 利用半牛顿迭代法<sup>[7]</sup>就可以得到瞬时频率的精确估计. 因此就可以得到精确的  $f$ .

### 4.3 复图像频谱平移

估计出频谱偏移量后, 复图像频谱平移的过程就比较简单. 这里给出一种频域实现方法: 分别对两幅图像进行  $N$  长的距离向离散傅立叶变换, 并通过在频域增加点数  $N$  来提高采样频率, 要求  $N > \text{int} \left( \frac{f}{f_s} \cdot N \right)$ ; 将图像 1 频谱向右平移  $N_1 = \text{int} \left( \frac{f}{2f_s} \cdot N \right)$ , 图像 2 频谱向左平移  $N_1$ .  $\text{int}(\cdot)$  表示对括号内的数据取整,  $f_s$  为雷达距离向的采样率.

### 4.4 复图像相加

频移后的复图像 1 和复图像 2 在频域对应相加. 然后进行  $N + N$  长的离散傅立叶反变换, 就可以得到提高距离向分辨率后的图像.

需要注意的是, 若采用 FFT 和反 FFT 实现 4.3 和 4.4 中的傅立叶变换和反变换, 则要求  $N$  和  $N + N$  为 2 的整数次幂.

## 5 计算机仿真及结果

根据单视复图像的信号模型, 仿真 L 波段分布式星载

SAR 中两颗小卫星获得的 SAR 复图像,利用第 4 部分给出的基于频谱偏移估计的方法进行提高距离分辨率的数据处理.基本的仿真参数为:  $H$  为 630km,  $\lambda$  为 0.23m,  $B_v$  为 5km, 极限基线长度  $B_c$  为 15km,  $B_w$  为 54MHz. 地面场景设为平地均匀面目标. 为了测量空间分辨率等点目标性能指标, 还插入一些单点目标和相距很近的双点目标.

通过仿真得到不同小卫星获得的分辨率相同的两幅单视 SAR 图像. 图 2 给出了小卫星获得的 SAR 图像. 图中横向表示距离向, 纵向为方位向. 复图像配准后相干涉, 得到图 3 给出的干涉相位图. 利用 4.2 中给出的方法, 估计图 3 中的干涉频率, 得到复图像频谱的偏移量为 17.92MHz. 分别对两幅复图像进行距离向的傅立叶变换, 在频域增加点数(这里将点数增加为原来的 2 倍), 频谱平移后相加, 得到如图 4 所示的图像.

分别在图 2 和图 4 中选出 5 个点目标进行质量评估, 得到表 1 的分辨率指标. 从表 1 可以看出, 图 2 和图 4 相比, 方位向分辨率变化不大; 距离向分辨率提高了很多. 分辨率提高的倍数为  $2.79/2.12 = 1.32$ . 根据文献[2], 理论上分辨率提高倍数应为  $1 + (B_v/B_c) = 1 + (5/15) = 1.33$ . 可以看出实际仿真结果与理论计算结果基本吻合.



图 4 距离分辨率提高后的图像

为了更清楚地反映距离向分辨率的提高, 图 5 和图 6 分别给出了图 2 和图 4 中邻近双点目标的距离向响应曲线. 图 5 中的曲线是对图 2 在距离向 2 倍插值后得到的. 可以看出, 与图 2 相比, 图 4 中的距离向分辨率确实提高了, 区分邻近目标的能力也增强了.

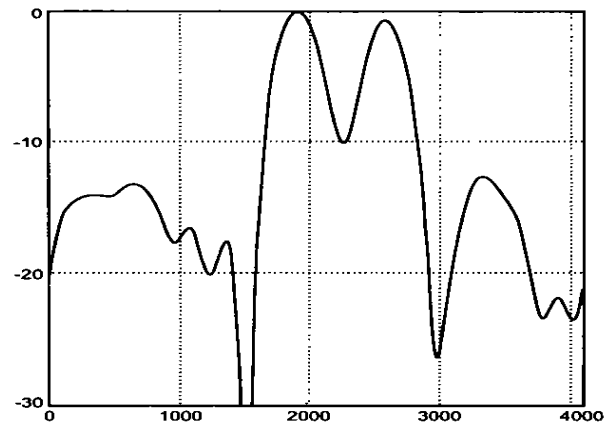


图 5 图 2 中距离向 2 倍插值后邻近双点目标的距离向曲线

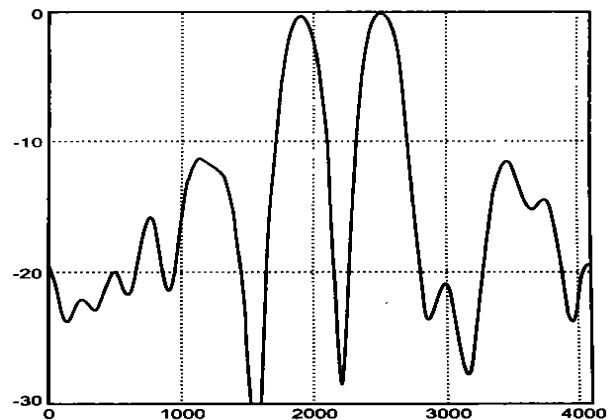


图 6 图 4 中邻近双点目标的距离向曲线



图 2 距离向分辨率提高处理前的 SAR 图像

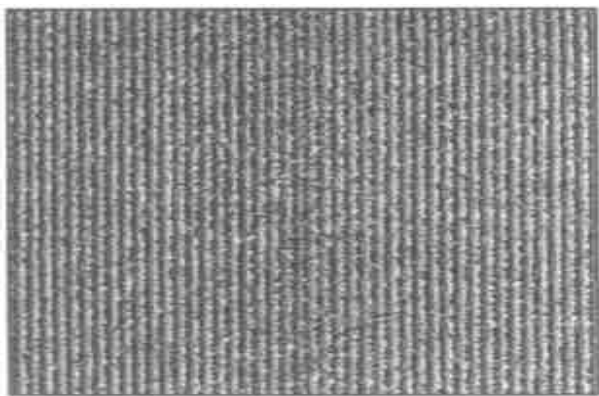


图 3 干涉相位图

表 1 图 2 和图 5 中点目标的分辨率指标

点目标	图 2 的分辨率指标 (m)		图 5 的分辨率指标 (m)	
	距离向	方位向	距离向	方位向
1	2.74	5.09	2.45	4.56
2	2.58	4.53	2.12	4.29
3	2.59	4.41	2.30	4.53
4	3.01	4.81	1.53	4.53
5	3.01	4.50	2.22	4.95
均值	2.79	4.67	2.12	4.57

## 6 结论

从本文的理论推导和仿真结果可以得到以下结论:

(1) 分布式星载干涉 SAR 中, 距离向具有一定基线的卫星获得的单视复图像经过频谱平移和复图像相加, 可以提高图像的距离向分辨率;

(2) 与原图像相比, 和图像距离向分辨率的提高比与距离向空间基线有关;

(3) 本文给出的基于频谱偏移估计的处理方法用于分布式星载 SAR 的仿真数据, 得到了距离向分辨率提高的 SAR 图像.

### 参考文献:

- [ 1 ] Prati C, et al. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 135 - 143.
- [ 2 ] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506 - 520.
- [ 3 ] Li F K, et al. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88 - 96.
- [ 4 ] Gatelli F, et al. The wavenumber shift in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 855 - 864.
- [ 5 ] Gabriel A K, et al. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(5): 857 - 872.
- [ 6 ] Trouve E, et al. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(6): 1963 - 1971.
- [ 7 ] Abatzoglou T. A fast maximum likelihood algorithm for frequency estimation of a sinusoid based on newton's method[J]. IEEE Transaction on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1985, 33(1): 77 - 89.

### 作者简介:



徐华平 女, 1977 年生于陕西, 在读博士研究生, 主要研究方向: 信息获取与处理, 高分辨率雷达成像, 分布式星载 SAR 的实现方法等.



周荫清 男, 1964 年生于湖南, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会员, 主要研究方向: 信息获取与处理, 高分辨率成像雷达和时变谱估计等.