

一种基于 UPF 的干涉 SAR 相位展开方法

谢先明¹,皮亦鸣¹,彭 保²

(1. 电子科技大学电子工程学院,四川成都 611731;2. 西南科技大学信息工程学院,四川绵阳 621006)

摘 要: 提出一种不敏粒子滤波的相位展开方法.该方法是不敏粒子滤波器与路径跟踪策略以及全方位的局部相位梯度估计相结合的结果,不受模型噪声统计特性和线性条件约束,同时完成噪声消除和相位展开;利用不敏卡尔曼滤波器来进行粒子更新,使重要密度函数能够融入最新观测信息和更加符合真实状态的后验概率分布,从而提高了相位展开精度与效率.仿真和实测数据处理结果验证了本文方法的有效性.

关键词: 不敏粒子滤波; 路径跟踪; 合成孔径雷达干涉测量

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0705-05

Phase Unwrapping: An Unscented Particle Filtering Approach

XIE Xian-ming¹, PI Yi-ming¹, PENG Bao²

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Department of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology of China, Mianyang, Sichuan 621006, China)

Abstract: This paper presents a phase unwrapping algorithm based on the unscented particle filter (UPF) for synthetic-aperture radar (SAR) interferometry. This method provides independence from noise statistics and is not constrained by the nonlinearity of the problem. This technique performs simultaneously noise filtering and phase unwrapping by the optimal data fusion approach. In addition, the importance density function is integrated with the latest observation information and is more in line with the posterior probability distribution of true phase by using an unscented Kalman filter (UKF) to carry out particle update, which also enhances the accuracy and the efficiency of the proposed method. Simulation and real data processing results validate the effectiveness of proposed method, and show a significant improvement with respect to the EKFP algorithm and other conventional unwrapping algorithms in some situations.

Key words: unscented particle filtering; path-following strategy; SAR interferometry

1 引言

干涉相位展开是干涉合成孔径雷达三维成像处理中的关键步骤,自 20 世纪 80 年代以来,就一直是干涉测量技术应用研究的热点和难点^[1].到目前为止,针对干涉相位展开问题已经提出了很多解决方法,这些方法基本上可以归结为两大类:一类^[2~4]是通过选择合适的积分路径,孤立不连续的点或掩盖质量较差区域,从而展开其它连续的或质量较好的区域,这一类方法俗称为路径跟踪法,有时难以获得完整的展开干涉图;另一类^[5~7]是基于最小范数法的相位展开算法,这类方法把相位展开问题转化为求解最小范数的问题,但如果权值选择不当或离散相位梯度估计不能反映真实的相位梯度,则会引入较大的误差^[1].且上述方法通常需要在相位展开之前先进行噪声滤波,这导致包含在噪声中的相

位信息丢失,从而影响相位展开的精度.

为解决上述问题,本文把粒子滤波与路径跟踪策略以及全方位的局部相位梯度估计结合起来,提出一种基于不敏粒子滤波的干涉相位展开方法(UPFPU).该方法不受模型噪声统计特性和线性条件约束,同时完成噪声消除和相位展开;该方法利用相位质量图导引粒子滤波器沿高质量区域到低质量区域的路径工作,避免了直接穿过噪声严重的区域导致的相位展开精度下降;利用不敏卡尔曼滤波^[8~12]来进行粒子更新,使重要性密度函数能够融入最新观测信息和更加符合真实状态的后验概率分布,从而提高了相位展开精度与效率;此外,利用局部频率估计器直接从复干涉图的功率谱中提取相位梯度及其估计误差方差等信息,有效地避免了相位展开中的“坡度欠估计”问题.仿真和实测数据处理结果验证本文方法的有效性,且与同属贝叶斯框架下的基于扩展

卡尔曼滤波的相位展开(EKFPU)方法^[13-15]及一些传统的相位展开技术相比具有较高的精度和较强的稳健性.

2 粒子滤波系统模型

2.1 状态方程

沿某一确定路径用 k 来代替 (m, n) , ϕ_k 表示 k 像元真实的干涉相位,可以得到如下的状态空间方程^[14]:

$$\begin{cases} x_k \propto \phi_k \\ x_{k+1} = x_k + pd_k \\ pd_k = \vec{pd}_k + e_{\phi_k} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, pd_k 表示 k 像元真实的相位梯度, \vec{pd}_k 为真实相位梯度的估计值, e_{ϕ_k} 为高斯白噪声,且满足: $E[e_{\phi_k}] = 0$; $Q_k = E[e_{\phi_k} e_{\phi_j}^T] = \sigma_{e,k}^2 \delta(k, j)$, $\delta(k, j) = \begin{cases} 1, & k = j \\ 0, & k \neq j \end{cases}$, $\sigma_{e,k}^2$ 为 k 像元相位梯度估计误差方差.

2.2 观测方程

把归一化的复干涉的同相分量和正交分量分别作为干涉相位的两个观测值,则可以写出

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \frac{\text{Im}(z_k)}{a_k} \\ \frac{\text{Re}(z_k)}{a_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\phi_k + \theta_k) \\ \cos(\phi_k + \theta_k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中,符号“ $\text{Im}(x)$ ”表示取 x 的虚部,“ $\text{Re}(x)$ ”表示取 x 的实部; z_k 为复干涉图 k 像元复干涉测量值, a_k 为复干涉测量幅度; θ_k 为干涉相位噪声,是一个随机过程,其概率分布主要取决于干涉图相干性以及数据预处理方式^[14,15],通常用零均值高斯噪声来模拟,本文也是如此.为了简化分析与计算,式(2)进一步简化为:

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \sin(\phi_k) \\ \cos(\phi_k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_k^1 \\ v_k^2 \end{bmatrix} = h[\phi_k] + \mathbf{v}_k \quad (3)$$

式(3)中, $\mathbf{v}_k = \begin{bmatrix} v_k^1 \\ v_k^2 \end{bmatrix}$, $v_k^i (i=1,2)$ 被认为是零均值的高斯白噪声.式(2)和式(3)表明当干涉相位噪声是高斯噪声时,式(3)中引入的量测模型噪声 \mathbf{v}_k 将不是高斯噪声,因此,严格上讲,量测模型噪声的高斯假设是不正确的,这也是有时 EKFPU 方法相位展开质量下降甚至失败的重要因素之一;由于粒子滤波不受模型噪声统计特性的约束,因此,式(3)中高斯假设的影响并不是非常关键的,且有 $\mathbf{R}_k = E[\mathbf{v}_j \mathbf{v}_k^T] = \text{diag}\{\sigma_{v,k}^2, \delta(k, j)\}$, $\sigma_{v,k}^2$ 与复干涉图像 k 像元信噪比成反比.于是可得如下状态方程和非线性的观测方程:

$$\begin{cases} x_k \propto \phi_k \\ x_{k+1} = f[x_k, e_{\phi_k}] = x_k + \vec{pd}_k + e_{\phi_k} \\ \mathbf{y}_{k+1} = h[x_{k+1}] + \mathbf{v}_{k+1} = \begin{bmatrix} \sin(x_{k+1}) \\ \cos(x_{k+1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{k+1}^1 \\ v_{k+1}^2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

3 基于路径跟踪的不敏粒子滤波相位展开算法

粒子滤波算法是一种蒙特卡罗方法,它的核心思想是根据观测值集 $\mathbf{y}_{1:k} = \{\mathbf{y}_t, t=1:k\}$,利用一系列随机样本的加权和表示所需的后验概率密 $p(x_k | \mathbf{y}_{1:k})$,并计算状态变量 x_k 估计值^[8].

3.1 不敏卡尔曼滤波算法

UKF算法核心是 UT(Unscented Transformation^[8-12]), UT使用最小集的确定性选择的 sigma 点来捕捉随机变量的后验均值和方差.

对于非线性方程 $z = f(x)$,其中 $x \in C^{N \times 1}$,则它的 Sigma 点如下:

$$\begin{aligned} \chi_0 &= \vec{x} = E[x] \\ \chi_j &= \vec{x} + (\sqrt{(N+\lambda)\mathbf{P}_x})_j, j=1,2,\dots,N \\ \chi_{j+N} &= \vec{x} - (\sqrt{(N+\lambda)\mathbf{P}_x})_j, j=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中, \mathbf{P}_x 为状态变量 x 的估计误差协方差, $(\sqrt{(N+\lambda)\mathbf{P}_x})_j$ 是 $(N+\lambda)\mathbf{P}_x$ 均方根矩阵的第 j 列向量.均值和协方差的权值系数如下:

$$\begin{aligned} b_j^m &= \lambda / (N + \lambda), j = 0 \\ b_j^c &= \lambda / (N + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta), j = 0 \\ b_j^c &= b_j^m = 1 / (2(N + \lambda)), j = 1, 2, \dots, 2N \end{aligned} \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: N 是状态变量 x 的维数(本文中 $N = 1$), $\lambda = \alpha^2(N + \kappa) - N$, 参数 α, β, κ (本文中, $\alpha = 0.01, \beta = 2, \kappa = 0$) 是用来调节 Sigma 点的;参数 α 用于设置 Sigma 点集到均值点的距离,通常为一个很小的整数; κ 通常取 0, β 用于融入随机变量的先验信息,对于高斯分布,通常取 $\beta = 2$,进一步的细节可参见文献[8~10],文献[8]尤为详尽.

3.2 不敏粒子滤波相位展开算法

针对第2节建立的粒子滤波系统模型,可按下面递推完成噪声滤波及相位展开:

(1)初始化 令 $k=1$,在质量较好区域选取一像元作为起始像元(起始缠绕相位为 φ_1),在区间 $(-\pi + \varphi_1, \pi + \varphi_1)$ 内均匀地抽取 N_s 点的粒子 $\vec{x}_1^i (i=1,2,\dots,N_s)$,且设定其估计误差方差 \mathbf{p}_1^i ;初始化权值: $w_1^i = 1/N_s$.这里假设两相邻相位之差在 $(-\pi, \pi)$ 之间(事实上总是满足这种情况),因此,区间 $(-\pi + \varphi_1, \pi + \varphi_1)$ 能完全覆盖了起始像元的状态空间.

(2)用 UKF 算法更新采样粒子 设 \vec{x}_k^i 和 $\mathbf{P}_k^i, i=1,2,\dots,N_s$ 分别为 k 像元粒子及相应的估计误差方差,通过式(5)可以计算得到每一个粒子的 Sigma 点 $\vec{x}_{k,j}^{a(i)}$,于是可按如下更新粒子:

$$\vec{x}_{k+1,j}^{a(i)} = f[\vec{x}_{k,j}^{a(i)}, \mathbf{0}]$$

预测:

$$\vec{x}_{k+1k}^i = \sum_{j=0}^{2N} b_j^m \vec{x}_{k+1k,j}^{a(i)} \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{k+1k}^i = \sum_{j=0}^{2N} b_j^c [\vec{x}_{k+1k,j}^{a(i)} - \vec{x}_{k+1k}^i] [\vec{x}_{k+1k,j}^{a(i)} - \vec{x}_{k+1k}^i]^T + \mathbf{Q}_k$$

$$\xi_{k+1k,j}^i = h[\vec{x}_{k+1k,j}^{a(i)}]$$

$$\vec{y}_{k+1k}^i = \sum_{j=0}^{2N} b_j^m \xi_{k+1k,j}^i$$

更新:

$$\mathbf{P}_{y,k+1k}^i = \sum_{j=0}^{2N} b_j^c [\xi_{k+1k,j}^i - \vec{y}_{k+1k}^i] [\xi_{k+1k,j}^i - \vec{y}_{k+1k}^i]^H + \mathbf{R}_{k+1}$$

$$\mathbf{P}_{xy,k+1k}^i = \sum_{j=0}^{2N} b_j^c [\vec{x}_{k+1k,j}^{a(i)} - \vec{x}_{k+1k}^i] [\xi_{k+1k,j}^i - \vec{y}_{k+1k}^i]^T \quad (8)$$

$$\gamma_{k+1}^i = \mathbf{P}_{xy,k+1k}^i / \mathbf{P}_{y,k+1k}^i$$

$$\vec{x}_{k+1}^i = \vec{x}_{k+1k}^i + \gamma_{k+1}^i (\mathbf{y}_{k+1} - \vec{y}_{k+1k}^i)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^i = \mathbf{P}_{k+1k}^i - \gamma_{k+1}^i \mathbf{P}_{xy,k+1k}^i \mathbf{P}_{xy,k+1k}^i \gamma_{k+1}^i$$

式(7)、(8)中, \mathbf{Q}_k 为 k 像元相位梯度估计误差方差; \mathbf{y}_k 和 \mathbf{R}_k 分别是 k 像元量测值及相应误差协方差。

(3) 抽取粒子 从均值和方差分别为 \vec{x}_{k+1}^i 和 \mathbf{P}_{k+1}^i 的正态分布 $N(\vec{x}_{k+1}^i; \vec{x}_{k+1}^i, \mathbf{P}_{k+1}^i)$ 中抽取粒子 \hat{x}_{k+1}^i , 抽取方法细节参见文献[8]。

(4) 计算各粒子的权值并归一化

$$w_{k+1}^{(i,l)} \propto p(\mathbf{y}_{k+1}^{(l)} | \hat{x}_{k+1}^i), l = 1, 2$$

$$\hat{w}_{k+1}^i = \frac{1}{2} \times \sum_{l=1}^2 w_{k+1}^{(i,l)} \quad (9)$$

$$\hat{w}_{k+1}^i = \hat{w}_{k+1}^i / \sum_{i=1}^{N_s} \hat{w}_{k+1}^i$$

式(9)中, $\mathbf{y}_{k+1}^{(l)}$ 表示观测矢量 \mathbf{y}_{k+1} 第 l 分量。

(5) 重采样 复制大权值粒子、减少小权值粒子,

即将旧的离散粒子群 $\{\hat{x}_{k+1}^i, \hat{w}_{k+1}^i, i = 1, 2 \dots N_s\}$ 用新的粒子群 $\{\vec{x}_{k+1}^i, w_{k+1}^i = 1/N_s, i = 1, 2 \dots N_s\}$ 取代, 具体细节请参见文献[8]。

$$(6) \text{ 状态估计: } \vec{x}_{k+1} = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \vec{x}_{k+1}^i \quad (10)$$

\vec{x}_{k+1} 即是所求的展开相位。式(7)~(10)为基于 UPF 的一维干涉相位展开算法, 粒子滤波器融合从复干涉图中提取的相位梯度及估计误差方差等信息, 同时完成滤波与相位展开。

3.3 基于路径跟踪的 2 维不敏粒子滤波相位展开算法 (UPFPU)

把粒子滤波与路径跟踪策略以及全方位的相位梯度估计结合起来, 由相位质量图(本文采用相位微分偏差图)导引粒子滤波器沿高质量区域到低质量区域的路径工作, 避免直接穿过噪声严重的区域导致的相位展开精度下降。

2 维不敏粒子滤波相位展开算法预测原理如图 1 所示, 任一像元的粒子预测值由相邻的 8 个像元中已展开像元的加权和得到;

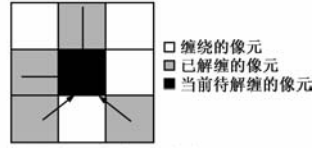


图1 2维粒子滤波预测原理

因此, 在 2 维 UPF 相位

展开算法中, 只有粒子预测公式(7)需要修正。用二维坐标 (m, n) 代替一维 k (m, n 分别表示方位向和距离向), 则 (m, n) 像元粒子 Sigma 预测值及误差协方差可以修正为:

$$\begin{aligned} \vec{x}_{(m,n)}^{-a(i)} &= \sum_{(a,s) \in (B \cap L)} d_{(a,s)}^i \vec{x}_{(m,n)|(a,s)}^{-a(i)} \\ \mathbf{P}_{(m,n)}^{-i} &= \sum_{j=0}^{2N} b_j^c [\vec{x}_{(m,n)}^{-a(i)} - \vec{x}_{(m,n)}^{-i}] [\vec{x}_{(m,n)}^{-a(i)} - \vec{x}_{(m,n)}^{-i}]^T \\ &\quad + \sum_{(a,s) \in (B \cap L)} d_{(a,s)}^i \mathbf{Q}_{(a,s)} \\ \vec{x}_{(m,n)}^{-i} &= \sum_{j=0}^{2N} b_j^m \vec{x}_{(m,n)}^{-a(i)} \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, B 表示当前待展开像元相邻 8 点组成的邻域, L 表示整幅图像。 $\vec{x}_{(m,n)|(a,s)}^{-a(i)}$ 表示由 (a, s) 像元粒子估计得到的当前像元的 Sigma 点的预测值, 且有:

$$\begin{aligned} \vec{x}_{(m,n)|(a,s)}^{-a(i)} &= \vec{x}_{(a,s)}^{-a(i)} + 2\pi f_{x(a,s)}(m-a) \\ &\quad + 2\pi f_{y(a,s)}(n-s) \end{aligned} \quad (12)$$

$f_{x(a,s)}$ 和 $f_{y(a,s)}$ 分别是以 (a, s) 像元为中心的窗口行和列方向局部频率估计值, 通过最大似然频率估计器获得^[16~18]。 $d_{(a,s)}^i$ 为优化权系数, 由下式获得:

$$\begin{aligned} d_{(a,s)}^i &= [\mathbf{P}_{(a,s)}^i \times \frac{1}{SN(a,s)}]^{-1} g(a,s) / \\ &\quad \sum_{(a,s) \in (B \cap L)} [\mathbf{P}_{(a,s)}^i \times \frac{1}{SN(a,s)}]^{-1} g(a,s) \end{aligned} \quad (13)$$

$d(a, s)$ 表示相邻已展开像元对当前像元的预测贡献与其估计误差及信噪比有关(信噪比高且估计误差小的已展开像元对相邻像元的预测贡献大)。 $SN(a, s)$ 表示 (a, s) 像元的信噪比; $g(a, s)$ 表示局部区域 B 内 (a, s) 像元是否为已相位展开的像元(0 表示未展开的像元, 1 表示已展开的像元)。

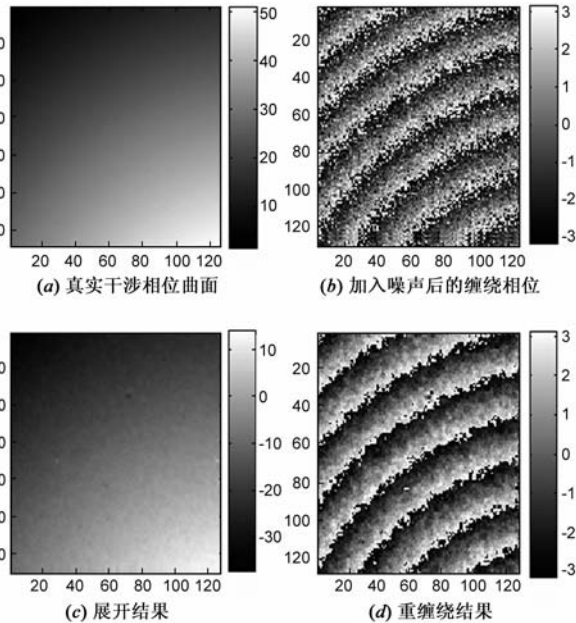
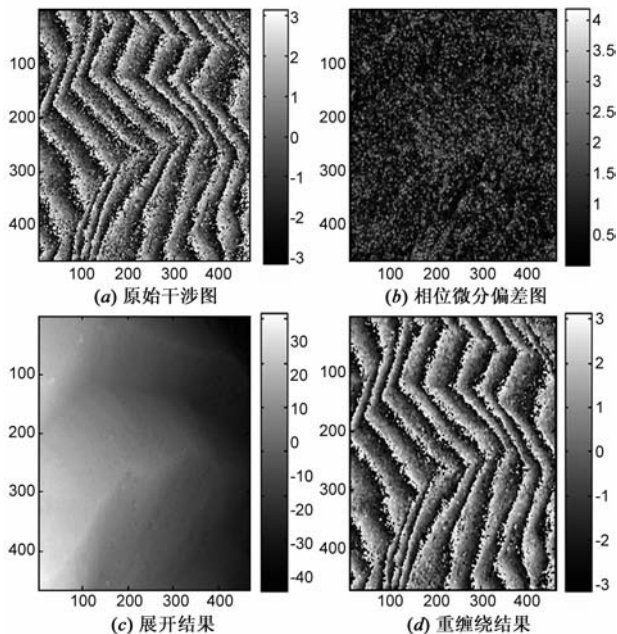
4 实验结果与分析

4.1 仿真实验与分析

为了使仿真数据与实测数据更一致, 真实的干涉相位曲面(俯视图 128×128) 是对一个锥形斜面做模拟成像干涉后获得的, 如图 2(a) 所示; 图 2(b) 是图 2(a) 加入标准方差为 1.0 rad^2 高斯噪声后的缠绕相位; UPF-PU 是非线性的方法, 没有近似线性化观测模型带来的相位信息损失, 且由相位质量图导引工作路径以避免直接穿越噪声严重的区域, 其展开相位图及重缠绕条纹较为平滑(重缠绕条纹平滑表明噪声消除效果明显), 见图 2(c) 和图 2(d)。为了定量分析相位展开精

表 1 相位展开精度比较

噪声方差/ rad^2	均方根误差			
	UPFPU	EKFPU	MNS	LS
0.49	0.4302	0.7356	1.1565	5.3166
0.64	0.5282	1.0746	1.5896	5.9025
0.81	0.6572	1.5775	1.9637	6.1213
1.00	1.1718	2.5257	2.3835	7.2157
1.21	1.5181	3.4439	3.0587	7.6157
1.44	3.0317	4.6022	3.6936	8.1233

图2 本文方法(粒子数 $N_s=80$)相位展开结果图3 本文方法(粒子数 $N_s=80$)相位展开结果

度,在实验中加入不同标准方差的高斯噪声,分别计算出 UPFPU、最小网络流算法(MNS)、最小二乘法(LS)以及 EKFPU 方法的均方根误差(均方根误差 = 展开相位与真实干涉相位之差的绝对值),如表 1 所示.从表 1 中可以看出:与 EKFPU、最小网络流法,最小二乘法等相比,UPFPU 方法误差是相当小的.在本文中,除 UPFPU 和 EKFPU 外,其他相位展开方法在相位展开之前,已进行了相位噪声滤波.

4.2 实测数据实验

实测数据(468×468)由美国 JPL 实验室提供,是 SIR-C 系统获得的并行双轨数据,成像区域为我国三峡某地区,原始干涉图如图 3(a)所示;图 3(b)为相位微分偏差图(引导展开路径);UPFPU 方法在完成噪声滤波的同时实现相位展开,其展开相位图及重缠绕条纹较为平滑且与原始干涉条纹接近程度高,见图 3(c)和图 3(d),实测数据处理结果同样证明本文方法的有效性和优越性.

5 结论

本文提出的基于贝叶斯框架下的相位展开方法(UPFPU)能同时完成干涉相位滤波及展开,并且在仿真和实测数据处理中均取得了较好的效果.本文方法是粒子滤波与路径跟踪策略以及全方位的相位梯度估计相结合的结果,与传统的一些方法(最小二乘法、网络流法)等相比,具有较高的精度和较强的稳健性;粒子滤波本质上是是非线性的,不受模型噪声统计特性和线性条件的约束,与 EKFPU 方法相比,UPFPU 方法也具有较高的精度和较强的稳健性.

参考文献

- [1] 刘国林,独知行,等.卡尔曼滤波在 InSAR 噪声消除与相位解缠中的应用[J].大地测量与地球动力学,2006,26(2):64-67.
LIU Guo-lin, DU Zhi-xing, et al. Application of Kalman filters to noise eliminating and phase unwrapping of InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 64-67. (in Chinese)
- [2] Goldstein R M, Zerber H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.
- [3] Wei Xu, Ian Gunning. A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 124-134.
- [4] Flynn T J. Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map[A]. Proceedings of the 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Piscataway: IEEE Press, 1996. 2057-2059.

- [5] Ghiglia D C, Romero L A. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1994, 11(1): 107 – 117.
- [6] Pritt M D. Phase unwrapping by means of multigrid techniques for interferometric SAR[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 728 – 738.
- [7] Ghiglia D C, Romero L A. Minimum LP-norm two-dimensional phase unwrapping[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1996, 13(10): 1 – 15.
- [8] 杨裙. 粒子滤波算法研究及应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
YANG Jun. Particle Filter Algorithm Research and Application [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] 徐小来, 雷英杰, 谢文彪. 基于 UKF 的自组织直觉模糊神经网络[J]. *电子学报*, 2010, 38(3): 639 – 645.
XU Xiao-lai, LEI Ying-jie, XIE Wen-biao. Self-organising intuitionistic fuzzy neural networks based on UKF[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(3): 639 – 645. (in Chinese)
- [10] 赵又群, 林 ■. 基于 UKF 算法的汽车状态估计[J]. *中国机械工程*, 2010, 21(5): 615 – 619.
ZHAO You-qun, LIN Fen. Vehicle state estimation based on unscented Kalman filter algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2010, 21(5): 615 – 619. (in Chinese)
- [11] Julier S J, Uhlmann J K. Unscented filtering and nonlinear estimation [A]. *Sequential State Estimation: From Kalman Filters to Particles Filters*[C]. Piscataway: IEEE Press, 2004. 401 – 422.
- [12] Julier S J. The scaled unscented transformation [A]. 2002 American Control Conference [C]. Piscataway: IEEE Press, 2002. 4555 – 4559.
- [13] Batuhan O, Shimon W. InSAR phase unwrapping based on extended Kalman filtering[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(4): 1197 – 1202.
- [14] Nies Holger, Loffeld Otmar, Wang Robert. Phase unwrapping using 2D-Kalman filter potential and limitations[A]. *Proceedings of the 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* [C]. Piscataway: IEEE Press, 2008. 1213 – 1216.
- [15] Loffeld Otmar, Nies Holger, Knedlik Stefan, Yu Wang. Phase unwrapping for SAR interferometry: a data fusion approach by Kalman filtering[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 47 – 58.
- [16] 武楠, 冯大政, 刘宝泉. 基于局部频率估计和有限元的相位展开方法[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(19): 4574 – 4578.
WU Nan, FENG Da-zheng, LIU Bao-quan. Phase unwrapping approach based on local frequency estimation and finite element method for interferogram[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(19): 4574 – 4578. (in Chinese)
- [17] 武楠, 冯大政, 刘宝泉. 一种局部频率估计的区域生长相位展开方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 34(1): 88 – 91.
WU Nan, FENG Da-zheng, LIU Bao-quan. A region growing phase unwrapping algorithm based on local frequency estimation for interferometric SAR [J]. *Xi'an Dianzi Keji Daxue Xuebao*, 2007, 34(1): 88 – 91. (in Chinese)
- [18] Emmanuel Trouv'e, Jean-Marie Nicolas. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimates [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1963 – 1965.

作者简介



谢先明 男, 1979年11月出生于四川省乐山市. 现为电子科技大学信号与信息处理专业博士研究生. 主要研究方向为雷达干涉成像及其应用.
E-mail: xxmxgm@163.com



皮亦鸣 男, 1968年10月出生于贵州. 现为电子科技大学教授、博士生导师, 中国电子学会高级会员. 目前主要从事雷达信号处理等方面的研究.