

引文格式: LONG Jiangping, DING Xiaoli, WANG Changcheng. Complex Coherence Estimation Based on Adaptive Refined Lee Filter [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(12): 1331-1339. (龙江平, 丁晓利, 汪长城. 自适应精致极化 Lee 滤波的复相干性估计方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1331-1339.) DOI: 10.11947/j. AGCS. 2015. 20140483

## 自适应精致极化 Lee 滤波的复相干性估计方法

龙江平<sup>1</sup>, 丁晓利<sup>1,2</sup>, 汪长城<sup>1</sup>

1. 中南大学测绘与国土信息工程系, 湖南 长沙 410083; 2. 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港

### Complex Coherence Estimation Based on Adaptive Refined Lee Filter

LONG Jiangping<sup>1</sup>, DING Xiaoli<sup>1,2</sup>, WANG Changcheng<sup>1</sup>

1. Department of Surveying and Geo-informatics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Land Surveying and Geo-informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

Abstract: Polarimetric synthetic aperture radar interferometry (PolInSAR) data procedures and their application are based on the estimation of polarimetric complex coherence, which are influenced by size of windows and filter methods. In this paper, the adaptive refined Lee filter, which based on traditional refined Lee filter, is used to estimate the interferometric coherence. The size of filter window is changed by the correlation coefficient between the central sub window and the neighboring sub window. Correlation coefficient which is larger than the threshold value means to the homogeneous pixels in the selected window, and then boxcar filter is chosen to estimate complex coherence. When maximum of correlation coefficient in difference windows sizes is smaller than the threshold value, the refined Lee filter is used to estimate the complex coherence. The efficiency and advantage of the new algorithm are demonstrated with E-SAR data sets. The results show that the influence of speckle noise and edge information is improved; more accurate complex coherence estimated by selected window size and selected pixels increase the accurate of forest parameters inversion.

Key words: refined Lee filter; adaptive window; PolInSAR; complex coherence; edge detection

Foundation support: The National High-tech Research and Development Program of China(863 program)(Nos. 2012AA121301; 2011AA120404); Hunan Natural Science Foundation Program(No. 12JJ4035)

摘 要: 干涉相干性包含了极化 SAR 干涉测量(PolInSAR)中的极化和干涉信息, 滑动窗口大小和滤波方法是准确估计干涉相干性的前提。本文以精致极化 Lee 滤波为基础, 根据边缘检测和邻域相干性高低区分同质区域和异质区域, 建立了自适应精致极化 Lee 滤波方法并估计相干性矩阵和干涉相干性。自适应精致极化 Lee 滤波能够根据边缘检测信息和邻域相干性高低程度调整滑动窗口大小并选择合适的估计方法, 不仅提高了抑制斑点噪声的能力, 而且保持了图像的边缘信息, 有利于提高干涉相干性的估计精度。试验结果表明, 该方法有效抑制了斑点噪声, 较好地保持了 SAR 图像的边缘信息, 有利于提高植被参数反演的精度。

关键词: 精致 Lee 滤波; 自适应窗口; 极化干涉相干性; 极化干涉测量; 边缘检测

中图分类号: P237.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2015)12-1331-09

基金项目: 国家 863 计划(2012AA121301; 2011AA120404); 湖南省自然科学基金(12JJ4035)

## 1 引 言

极化 SAR 干涉测量(PolInSAR)集成了极化和干涉测量的特性, 是获取植被参数的有效方法之一<sup>[1]</sup>。极化干涉相干性是极化 SAR 干涉测量提取

植被参数的重要信息来源, 包含了散射地物的全部极化和干涉信息。极化干涉相干性的估计精度决定着植被参数反演的精度, 因此高效、可靠地估计极化复相干性是极化干涉 SAR 信息处理的关键。

干涉相干性的估计是通过极化 SAR 干涉相

干矩阵  $T_6$  提取的,目前极化 SAR 干涉相干矩阵的估计最常见的是 Boxcar 估计方法。该方法能够快速估计极化 SAR 干涉相干矩阵,但是牺牲了 SAR 图像的空间分辨率,不能有效地分辨窗口中散射地物的同质像素,损失了边缘信息。Boxcar 估计的极化干涉相干矩阵导致相干性偏低,则反演植被高度偏高<sup>[2-3]</sup>。为了有效地利用 SAR 图像中散射地物的同质性质,文献[3—5]建立了以图像强度为基础的区域生长算法,突破了固定模板窗口大小,充分利用邻域范围内具有相同散射特性的像素,在一定程度上提高了复相干性估计的可靠性,但是区域生长算法根据单个像素间散射强度判断种子与邻域是否符合散射同质性,未能考虑散射体的形状,并且运算效率很低;文献[6—7]从精致 Lee 滤波在极化 SAR 图像中的应用出发,将精致 Lee 滤波应用到极化干涉 SAR 相干矩阵的估计中,通过建立主辅 SAR 图像总功率图,采用非方形窗口和局部线性最小均方差估计方法(LMMSE)估计极化干涉相干矩阵。该方法选择非方形窗口估计相干矩阵,保存了图像边缘信息,防止了极化通道串扰,提高了极化复相干性的估计可靠性,但是该方法未考虑窗口大小的变化。为了改善精致极化 Lee 滤波的效果,文献[7]在固定滑动窗口下根据改进中值滤波选择同质区域,改善了在弱纹理地区的精致极化 Lee 滤波的效果;文献[8]根据地物散射类型选择同质区域,改善了精致极化 Lee 滤波并提高了极化分类精度;文献[9]根据等效视数提出窗口自适应精致极化 Lee 滤波,改善了滤波效果。这些改进的精致极化 Lee 滤波方法考虑了窗口大小的变化,并在不同程度上优化了斑点噪声的滤波效果,但是未考虑复相干性估计可靠性与窗口大小的关系,特别是在边缘信息处理时,偏重于边缘信息保存而采用较小的窗口,不利于提高相干性估计的可靠性。

极化干涉相干矩阵是估计干涉相干性的基础,极化干涉相干性高低程度不仅需要窗口内像素的同质性,还需要考虑其他失相干因素,因此极化干涉相干性估计精度不仅与选择的滑动窗口大小和窗口中像素同质性有关,而且与选择的同质区域相似性高低有关。窗口大小决定估计相干矩阵的备选像素的数量,较小的滑动窗口则估计值偏高,较大窗口则牺牲了图像分辨率,损失了图像的边缘信息;同质区域的相似性高低反映了 SAR 图像的干涉质量以及干涉相位的稳定性。

为了既能够减少空间分辨率的损失,又能准确估计极化干涉相干性,本文以精致极化 Lee 滤波为基础,在主辅极化 SAR 图像总功率图的基础上建立自适应窗口,根据边缘检测和邻域相似性高低区分同质区域和异质区域,建立自适应精致极化 Lee 滤波方法并估计相干性矩阵和干涉相干性。

## 2 精致极化 Lee 滤波的相干性估计

### 2.1 极化干涉相干矩阵和极化干涉相干性

全极化 SAR 图像,每一个分辨单元可以用极化散射矩阵  $S$  来描述,在满足互易条件的散射场景下,全极化 SAR 散射矩阵可以表示为 Pauli 基矢量形式<sup>[10]</sup>

$$\mathbf{K} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{S}_{HH} + \mathbf{S}_{VV} \quad \mathbf{S}_{HH} - \mathbf{S}_{VV} \quad \mathbf{S}_{HV}]^T \quad (1)$$

在两次成像时可以获取对应的全极化 SAR 数据,对每个像元形成两个矢量  $\mathbf{K}_1$ 、 $\mathbf{K}_2$ ,极化相干矩阵  $T_6$  可以通过矢量的外积构成<sup>[11]</sup>

$$[T_6] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1^{*T} & \mathbf{K}_2^{*T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & \Omega_{12} \\ \Omega_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $[T_{11}]$ 、 $[T_{22}]$ 、 $[\Omega_{12}]$  和  $[\Omega_{21}]$  是  $3 \times 3$  的复矩阵; \* T 表示共轭转置,其中  $[T_{11}] = \langle \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_1^{*T} \rangle$ ,  $[T_{22}] = \langle \mathbf{K}_2 \mathbf{K}_2^{*T} \rangle$ ,  $[\Omega_{12}] = \langle \mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2^{*T} \rangle$ , 且  $\Omega_{21} = \Omega_{12}^{*T}$ ;  $[T_{11}]$  和  $[T_{22}]$  是包含各自影像全极化信息的相干矩阵;  $[\Omega_{12}]$  不仅含有极化信息,而且还含有两幅影像的干涉相位信息<sup>[1,12]</sup>。

为了获得两个极化散射矢量表示的复干涉系数,定义单位复矢量  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 记  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为极化散射矢量  $\mathbf{K}_1$ 、 $\mathbf{K}_2$  在单位矢量  $\omega_1$  和  $\omega_2$  上的投影<sup>[13-14]</sup>

$$\left. \begin{aligned} \mu_1 &= \omega_1^{*T} \mathbf{K}_1 \\ \mu_2 &= \omega_2^{*T} \mathbf{K}_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

结合式(2)和式(3),复相干系数  $\gamma$  可以表示为<sup>[14-15]</sup>

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = |\gamma| e^{i\phi} = \frac{\omega_1^{*T} [\Omega_{12}] \omega_2}{\sqrt{\omega_1^{*T} [T_{11}] \omega_1 \omega_2^{*T} [T_{22}] \omega_2}} \quad (4)$$

### 2.2 精致极化 Lee 滤波的复相干性估计

精致极化 Lee 滤波是一种基于边缘检测的滤波算法。该滤波方法以主辅极化 SAR 图像的总功率 Span 图作为滤波对象,在固定的滑动窗口下,把滑动窗口分成  $3 \times 3$  的子窗口,然后分别计算各个子窗口的均值,并形成  $3 \times 3$  的均值矩阵。图 1 是窗口为  $7 \times 7$  时对应的梯度算子和边缘方向窗口,包括垂直、水平、 $45^\circ$  和  $135^\circ$  等 4 个方向的

模板<sup>[16-17]</sup>。将均值矩阵利用梯度模板进行边缘检测,确定滑动窗口的边缘方向窗口。确定边缘方向后,根据边缘方向窗口中确定的像素估计极化干涉相干矩阵  $T_6$ 。

精致极化 Lee 滤波将极化 SAR 图像中的斑点噪声视为乘性噪声模型,假设  $y$  表示实际 SAR 图像强度(含有噪声); $x$  是不含噪声的 SAR 图像强度,描述了散射目标的雷达后向散射信号; $v$  为斑点噪声,且属于均值为 1、方差  $\sigma_v^2$  的平稳白噪声,则乘性斑点噪声模型<sup>[5-6]</sup>为

$$y = x \times v \tag{5}$$

则在 LMMSE 原则下滤波后的像素值  $\hat{x}$  表示为

$$\hat{x} = \bar{y} + b(y - \bar{y}) \tag{6}$$

式中, $y$  为中心像素值; $\bar{y}$  为邻域均值; $b$  为加权系数,其表达式为

$$b = \frac{\text{var}(y) - \bar{y}^2 \hat{\sigma}_v^2}{(1 + \hat{\sigma}_v^2) \text{var}(y)} \tag{7}$$

式中, $\text{var}(y)$  表示局部邻域的方差; $\hat{\sigma}_v^2$  表示噪声方差。从式(6)可以看出,在同质区域, $b=0, \hat{x}=\bar{y}$ ;在边缘区域, $b=1, \hat{x}=y$ ,即为中心像素值。

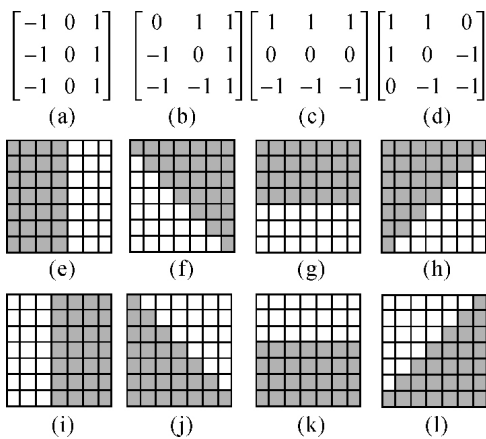


图 1 梯度算子和边缘方向窗口

Fig. 1 Four edge mask and eight edge-aligned windows

在极化 SAR 干涉测量中,为了不损害极化和干涉信息,精致极化 Lee 滤波估计极化相干矩阵是在主辅全极化 SAR 图像的总功率 Span 图上选择边缘方向窗口,极化总功率 Span 图表示为<sup>[6]</sup>

$$\text{Span} = \frac{1}{2} (|S_{HH}^1 + S_{VV}^1|^2 + |S_{HH}^1 - S_{VV}^1|^2 + |2S_{HV}^1|^2 + |S_{HH}^2 + S_{VV}^2|^2 + |S_{HH}^2 - S_{VV}^2|^2 + |2S_{HV}^2|^2) \tag{8}$$

然后利用边缘方向窗口中所有像素估计极化相干矩阵的均值  $\bar{T}_6$ 、加权系数  $b$  以及中心像素的极化

相干矩阵  $T_6$ ,在 LMMSE 原则下估计滤波后的相干矩阵  $\hat{T}_6$  矩阵<sup>[18-20]</sup>

$$\hat{T}_6 = \bar{T}_6 + b(T_6 - \bar{T}_6) \tag{9}$$

并通过式(3)、式(4)估计不同极化状态下的复干涉相干性。

### 3 自适应精致极化 Lee 滤波的复相干性估计

精致极化 Lee 滤波的边缘检测是在固定窗口中进行,窗口中所有像素统计特性的差异将影响边缘方向窗口的选择。当滑动窗口中的像素满足散射同质性要求时,窗口的大小变化不会影响边缘方向窗口的选择;当滑动窗口中的像素为散射异质区域时,不同滑动窗口下选择的边缘方向窗口不一致。为了更加细致地区分边缘区域和非边缘区域,需要通过边缘检测算子确定边缘梯度方向和合适梯度强度阈值,因此可以根据地物散射特性选择合适的窗口和滤波方法,提高相干矩阵估计精度。

#### 3.1 边缘信息检测

极化 SAR 干涉相干性估计不仅需要保留边缘信息,而且需要准确估计干涉相干性,克服固定窗口的不足。在选择方向窗口之前,根据图像特征和边缘检测方法确定图像的边缘信息,有助于更好地保留极化 SAR 图像的边缘信息。

在边缘检测后的极化 SAR 图像中,位于图像边缘上的像素需要采用较小的窗口以保留图像的边缘信息;位于非图像边缘的像素需要根据窗口内像素统计特性合理选择窗口大小,即自适应窗口。极化 SAR 图像边缘信息检测以主辅极化 SAR 图像的总功率 Span 图为基础,并将 Span 图进行对数变换和线性拉伸,提高图像的对比度。

Sobel 算子是常见的边缘检测算子,通过横向和纵向的边缘检测算子获取 Span 图像中像素的横向和纵向梯度,其中 Sobel 算子可以表示为

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中, $G_x$  和  $G_y$  表示为横向和纵向方向的梯度,检测图像的梯度强度  $G$  可以表示为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \tag{11}$$

为了从 Span 图中的梯度信息中提取边缘信息,需要根据图像和梯度信息选取合理的阈值。合理的阈值可以将梯度信息中梯度变化较大的边

缘信息与背景分开,提高背景与边缘信息的对比度,提取完整的边缘信息。

为了增强背景和边缘信息的对比度,将梯度强度信息线性变换到 0~255 的区间,通过背景和边缘信息的均值比确定阈值大小,背景的梯度强度均值  $\mu_1$  可以表示为

$$\mu_1 = \frac{\sum G_i \times N_i}{\sum N_i} \quad i=0,1,2,\dots,T \quad (12)$$

式中,  $G_i$  为线性变换后的梯度强度;  $N_i$  为该梯度强度的像元个数;边缘信息的梯度强度均值  $\mu_2$  为

$$\mu_2 = \frac{\sum G_i \times N_i}{\sum N_i} \quad i=T+1,\dots,255 \quad (13)$$

根据背景均值和边缘信息的均值,均值比  $R$  可以表示为

$$R = f(T) = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (14)$$

则边缘检测的阈值可以从变换后梯度强度的范围搜索到最大均值比  $R_{\max}$ 。  $R_{\max}$  对应的梯度强度则为边缘检测的阈值  $T_{R_{\max}}$ , 则

$$T_{R_{\max}} = \max(f(T)) \quad (15)$$

在极化 SAR 图像中,当梯度强度大于  $T_{R_{\max}}$  时,则认为该像元位于边缘信息区域。为了保留边缘信息,则需要采用较小的滑动窗口估计极化干涉相干性,减少空间分辨率的损失。

### 3.2 自适应窗口

在极化 SAR 干涉测量中,极化干涉相干性的估计不仅需要抑制斑点噪声的影响,还需要减弱去相干因素的影响,因此相干性估计的窗口中不仅需要含有较多的同质像元,而且同质像元之间的相似性很高。相干性高低不仅与极化 SAR 图像的信噪比有关,而且与窗口内像素的同质性有关。在衡量中心像素和周围像素是否为同质区域时,通常认为块状区域之间的统计比单个像素之间的统计更加符合地物的散射特性。自适应精致极化 Lee 滤波通过计算中心窗口与邻域窗口的相似性,以中心窗口和邻域窗口的相似性高低选择合适的窗口大小,既能较好地抑制极化 SAR 图像斑点噪声,又能减弱去相干因素对相干性估计的影响,提高极化干涉相干性的估计精度。

自适应精致极化 Lee 滤波在估计极化干涉相干性之前,在主辅极化 SAR 图像的总功率 Span 图建立自适应滑动窗口,窗口的变换范围从  $5 \times 5$  到  $11 \times 11$ 。在滑动窗口内建立包含中心像素的子窗口以及周围相同尺寸的邻域子窗口。包含窗

口中心像素的子窗口称为中心窗口  $f$ ,周围其他的子窗口称为邻域窗口  $g$ 。为了判断邻域窗口和中心窗口的同质性,计算两个子窗口的相似性  $\gamma$ ,具体的公式为

$$\gamma_{k,l} = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (f_{i,j} - \bar{f})(g_{i,j} - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (f_{i,j} - \bar{f})^2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (g_{i,j} - \bar{g})^2}} \quad (16)$$

式中,  $\bar{f} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n f_{i,j}$ ;  $\bar{g} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n g_{i,j}$ ;  $n$  为子窗口大小,且  $n=3$ 。

当滑动窗口为  $5 \times 5$  时,式(16)计算的每一个邻域子窗口相干性构成  $3 \times 3$  的邻域相似性矩阵  $M_\gamma$ ,且邻域相似性矩阵  $M_\gamma$  的中心像元为 1,图 2 表示滑动窗口为  $5 \times 5$  时的相似性矩阵  $M_\gamma$ 。滑动窗口中包含的像素是否为同质区域,是通过邻域相似性矩阵  $M_\gamma$  的中心元素的邻域的均值  $\bar{\gamma}$  来衡量的。根据自适应窗口的变化范围, $\bar{\gamma}$  可以表示为

$$\bar{\gamma} = [\bar{\gamma}_{5 \times 5} \quad \bar{\gamma}_{7 \times 7} \quad \bar{\gamma}_{9 \times 9} \quad \bar{\gamma}_{11 \times 11}] \quad (17)$$

当窗口大小为  $k \times k$  时,均值  $\bar{\gamma}_{k \times k}$  可以表示为

$$\bar{\gamma}_{k \times k} = \sum M_\gamma(i,j) / (k-2)^2 - 1 \quad (18)$$

$$i=j=1,2,\dots,k-2; i \neq j$$

在不同滑动窗口中,计算邻域的相似性均值  $\bar{\gamma}$  并取最大值  $\bar{\gamma}_{\max}$ ,并将最大值  $\bar{\gamma}_{\max}$  作为衡量相似性高低和窗口下像元同质性的依据

$$\bar{\gamma}_{\max} = \max(\bar{\gamma}) \quad (19)$$

为了识别滑动窗口是否为同质区域,根据相似性高低程度设立相似性均值的阈值  $\gamma_T$ 。当  $\bar{\gamma}_{\max} > \gamma_T$  时,则认为邻域窗口和中心窗口是同质区域;当  $\bar{\gamma}_{\max} < \gamma_T$  时,则认为是异质区域。同质区域则依据相似性均值的最大值  $\bar{\gamma}_{\max}$  确定的滑动窗口进行 Boxcar 滤波估计滤波系数  $b$ 、极化干涉相干矩阵  $\hat{T}_0$  和极化相干性;异质区域则依据相似性均值的最大值  $\bar{\gamma}_{\max}$  确定的滑动窗口大小进行精致极化 Lee 滤波,从而进一步确定边缘方向窗口,估计滤波系数  $b$ 、极化干涉相干矩阵  $\hat{T}_0$  和极化相干性。

干涉相干性估计的样本数量决定相干性估计的可靠性,太小的窗口则包含像元太少,极化干涉相干性的估计偏差较大,因此自适应窗口变换范围从  $5 \times 5$  到  $11 \times 11$ 。当滑动窗口为  $7 \times 7$  时,以  $3 \times 3$  的子窗口建立中心窗口和邻域窗口,则相似性矩阵  $M_\gamma$  为  $5 \times 5$ ;当滑动窗口为  $9 \times 9$  和  $11 \times 11$  时,则相似性矩阵  $M_\gamma$  依次增大,通过相似性矩

阵  $M_\gamma$  反映中心像素与周围邻域的相似程度,利用相似性的高低可以辨别同质区域。

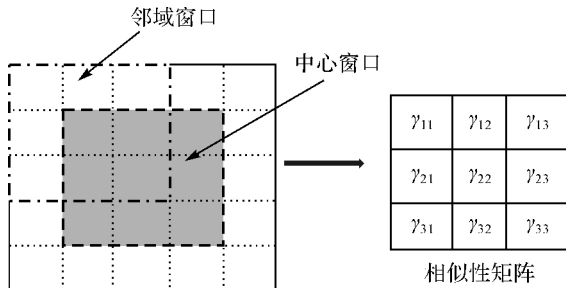


图 2 5×5 滑动窗口和邻域相干性矩阵的建立

Fig. 2 5×5 window and construction 3×3 correlation coefficient matrix

### 3.3 改进的估计方法

自适应精致极化 Lee 滤波以边缘检测和自适应窗口内的相似性高低为基础,建立位于边缘区域和同质区域的判别依据,并采用不同的窗口估计极化干涉相干性。当中心像元处于边缘区域中,则采用最小的窗口利用 Boxcar 滤波估计极化相干矩阵;当中心像元不在边缘信息上,则根据平均相似性衡量像元的同质性。当中心像元的平均相似性高于给定的阈值  $\gamma_T$ ,则在最高相似性对应的滑动窗口下的利用 Boxcar 滤波估计极化相干矩阵;当中心像元的平均相干性低于给定的阈值  $\gamma_T$ ,则在最高相似性对应的滑动窗口下的利用精致极化 Lee 滤波估计极化干涉相干性的计算步骤如下。

(1) 计算 Span 图的梯度强度,自动搜索梯度强度阈值  $T_{R_{max}}$ 。

(2) 中心像元处于边缘信息上,则选择最小的方向窗口进行 Boxcar 滤波。

(3) 中心像元不在边缘信息上,则以不同滑动窗口估计中心窗口和邻域窗口的相似性矩阵  $M_\gamma$ ,获取相干性矩阵  $M_\gamma$  的均值  $\bar{\gamma}$ 。

(4) 设立相似性阈值  $\gamma_T$ ,获取相似性均值的最大值  $\bar{\gamma}_{max}$  及其相应的窗口大小。

(5) 当  $\bar{\gamma}_{max} > \gamma_T$ ,认为该窗口下各个像素为同质区域,则选取相似性均值为  $\bar{\gamma}_{max}$  的窗口进行 Boxcar 滤波;否则,认为该窗口下各个像素为异质区域,则选取相似性均值为  $\bar{\gamma}_{max}$  的窗口进行精致极化 Lee 滤波。

(6) 在选择的窗口内同质区域的像素估计滤波系数  $b$ 。

(7) 利用滤波系数  $b$  估计滤波后的极化干涉相干矩阵  $\hat{T}_6$  和不同极化状态下的复干涉相干性。

## 4 试验及其结果分析

自适应精致极化 Lee 滤波是根据地物的统计性质自动判别滑动窗口的大小,并选择合适的滤波方法估计极化干涉相干矩阵和复干涉相干性,为了验证该算法的有效性,本文采用机载 E-SAR 全极化数据分析不同滤波方法对斑点噪声的抑制能力和极化干涉相干性估计的影响。

### 4.1 试验数据

为了分析和研究自适应精致极化 Lee 滤波的优劣性,本文采用的机载 DLR ESAR 系统在德国 Oberpfaffenhofen 地区获取的 L 波段全极化 SAR 数据,试验数据的大小为  $700 \times 800$  像素。试验区域地势平坦,地物种类比较丰富,包含森林、道路、草地和建筑物等散射地物,图 3 为 E-SAR 数据 Pauli 基彩色合成图。

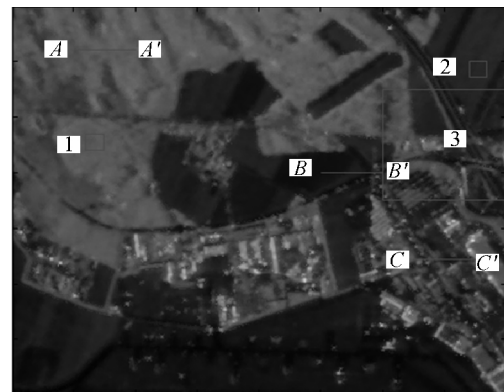


图 3 E-SAR 数据 Pauli 基合成图,其中选择了矩形区域 1、2 和 3,线段  $AA'$ 、 $BB'$  和  $CC'$

Fig. 3 E-SAR RGB composite image with Pauli scattering components, and selected rectangle region 1, region 2 and region 3; The segment is line  $AA'$ 、 $BB'$  和  $CC'$

### 4.2 自适应精致极化 Lee 滤波

试验数据采用  $5 \times 5$ 、 $7 \times 7$  的 Boxcar、 $5 \times 5$ 、 $7 \times 7$  和  $9 \times 9$  的精致极化 Lee 滤波和自适应精致极化 Lee 滤波估计极化干涉相干矩阵和相干性。为了提高极化干涉相干性的估计精度,位于边缘区域上的像元采用  $5 \times 5$  的 Boxcar 的滤波。一般情况下估计的相似性高于 0.9 可以认为是高相干区域,则同质与异质区域的相似性阈值设为 0.9。根据平均相关性的高低选择不同的滑动窗口和滤

波方法,同质区域采用方形窗口,异质区域采用非方形窗口。

图4为图3中矩形区域3对应的3种方法滤波后Pauli基合成图。Boxcar滤波在 $5 \times 5$ 的窗口下,保留了部分边缘信息,但是图像的空间分辨率降低,随着窗口增大影响越严重,图像的模糊度增强;在 $5 \times 5$ 的窗口下,精致极化Lee滤波的结果比Boxcar滤波要好,保留了部分细节信息,出现了轻微的扇贝效应和虚拟细线,但随着窗口的增大,扇贝效应和虚拟细线增多,影响了图像的质量;自适应精致极化Lee滤波的结果具有较高的空间分辨率,边缘信息保存较好,也没有出现扇贝效应和虚假细线。

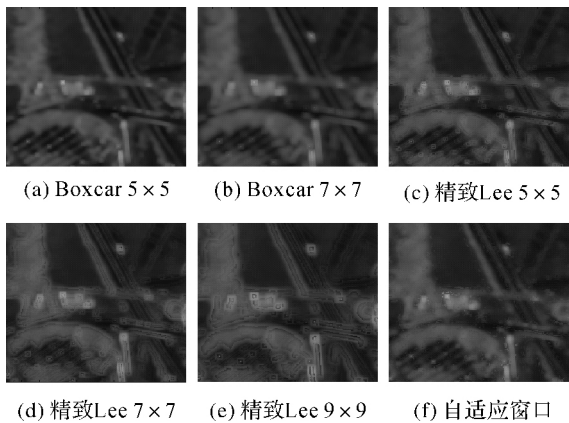


图4 3种滤波方法的Pauli基合成图

Fig. 4 RGB composite image with Pauli scattering components by different filter and different windows size

为了进一步衡量3种滤波方法的优劣性,本文选择了 $5 \times 5$ 的Boxcar、 $5 \times 5$ 和 $7 \times 7$ 精致极化Lee滤波以及自适应精致极化Lee滤波,在图3中选择1、2号同质区域,比较均值、等效视数、边缘保持指数等评价指标,其中区域1为森林区域,像素大小为 $30 \times 30$ ,区域2为草地,像素大小为 $30 \times 30$ 。不同滑动窗口、不同滤波方法滤波后的评价指标见表1。从表1可以看出,Boxcar滤波的去噪能力和边缘保持能力较差,精致极化Lee滤波可以提高去除斑点噪声的能力,随着窗口增大,ENL值增大,但是EPI值减小,丢失了图像的边缘信息。自适应精致极化Lee滤波方法通过选择边缘信息和合适的估计窗口,ENL值比其他两种方法优越,EPI值提高也很明显。通过自适应窗口,不但很好地抑制了斑点噪声,改善了滤波效

果,提高了同质区域的等效视数,而且边缘保存指数也比Boxcar滤波、固定窗口的精致极化Lee滤波有明显改善。

表1 不同滤波方法的精度评定

Tab. 1 Precision of different filter methods

区域	数值	Boxcar 5×5	精致极化Lee		本文方法 自动
			5×5	7×7	
区 域 1	均值	330.4	330.3	330.4	330.3
	ENL	39.8	41.1	44.9	47.1
	EPI	0.36	0.69	0.67	0.76
区 域 2	均值	30.11	30.20	30.20	30.25
	ENL	100.3	106.6	125.3	130.1
	EPI	0.36	0.68	0.63	0.75

#### 4.3 复干涉相干性估计及其结果分析

自适应精致极化Lee滤波通过中心窗口和邻域窗口的相干性高低程度选择合理的滑动窗口,滤波结果提高了SAR图像抑制斑点噪声的能力,也最大限度地保留了边缘细节信息,提高了极化SAR图像质量。根据估计的滤波系数 $b$ ,在LMMSE的原则下估计了极化干涉相干矩阵 $\hat{T}_6$ 和不同极化状态下极化干涉相干性。

图5为不同方法估计的HH相干性,其中Boxcar滤波估计的相干性在窗口较小时存在过高的估计,增大窗口则会出现结块现象。Boxcar滤波估计中的方形窗口使得低相干区域的估计相干性偏高,高相干区域的估计相干性偏低,图像的空间分辨率降低。精致极化Lee滤波估计的相干性保存了部分边缘信息,图5中估计窗口为 $5 \times 5$ 时,相干性的边缘信息丰富,空间分辨率较高,但是窗口中的像元过少导致相干性估计偏高。随着窗口的增大,相干性中的扇贝效应虚假细线影响了相干性估计,甚至降低了相干性估计的质量,使得干涉相位出现偏差。自适应精致极化Lee滤波不仅使窗口中有足够多的像元,而且通过边缘检测和非方形窗口,较好地保存了地物特征,相干性结块现象降低。

在图3中选择不同散射特性的3类地物,其中线段 $AA'$ 为森林区域,在HH极化下为低相干区域,线段 $BB'$ 为草地,在HH极化下为高相干区域,线段 $CC'$ 为建筑区域,在HH极化下属于二面散射,为高相干区域。图6为3种散射地物均在 $7 \times 7$ 窗口下的Boxcar和精致极化Lee以及自适应精致极化Lee等3种方法估计的HH极化相干性和相位的剖面图,剖面图的横轴为剖

面线方向,纵轴为估计的相干性和干涉相位,其中左边是相干性,右边是干涉相位。

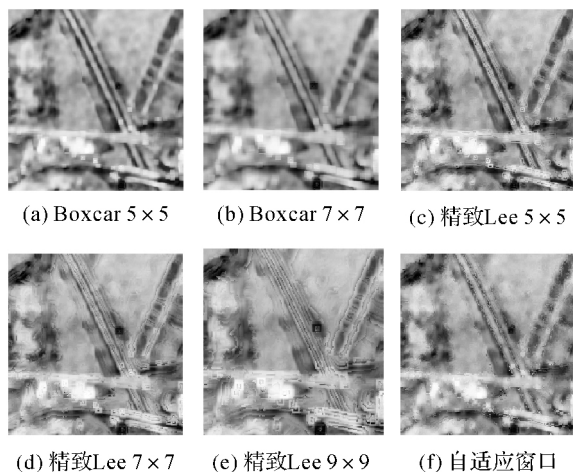


图 5 不同方法估计 HH 相干性

Fig. 5 Coherence of HH with different estimated method

AA'剖面线为相干性较低的森林区域,散射特性基本相同,不同方法估计相干性和相位总体差异不大,但是在散射特性有变化的区域,自适应精致极化 Lee 估计的相干性优于 Boxcar 和固定窗口的精致 Lee 滤波。BB'剖面线为相干性较高的草地区域,自适应精致极化 Lee 估计的相干性和相位比 Boxcar 滤波和精致极化 Lee 滤波的变化趋势更加平稳,特别是相位的变化更细致。从图 6 中可以看出, BB'剖面线后半部分处理道路时,相位估计值有很大的变化,体现了边缘信息的变换,而精致 Lee 估计的相位未能体现。CC'剖面线为高相干性的建筑区域,3 种方法估计的相干性和相位在建筑物上是一致的,在非建筑物上自适应精致极化 Lee 估计的相干性较小,估计的相位变化趋势一致,但本文方法能够细致地反映散射地物的变化精细程度。

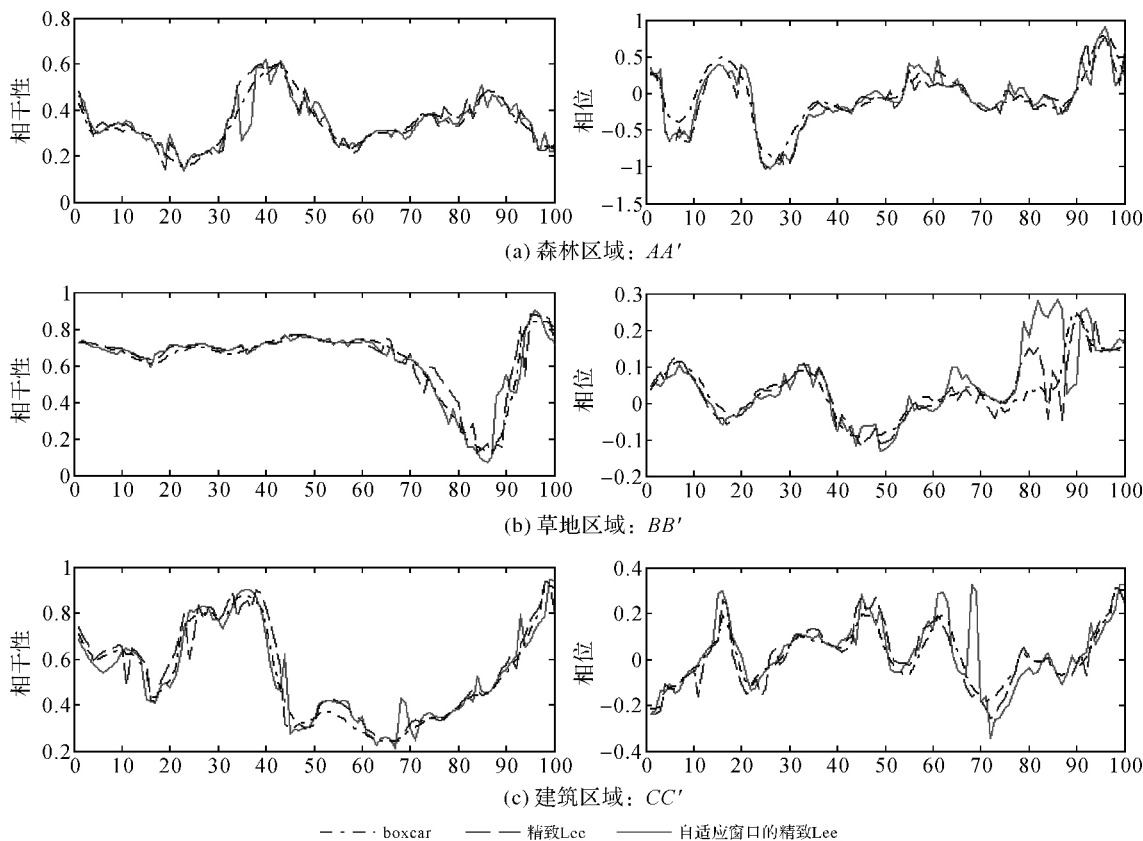


图 6 植被、草地和建筑 HH 极化相干性和相位

Fig. 6 Coherence and phase from forest, grass and building area

在图 6 的基础上分别选择 3 个区域中某一个像元,计算该像元在不同极化状态下的复干涉相干性。图 7 为 3 种不同散射地物在自适应精致极化 Lee 估计的不同极化状态下复干涉相干性,复平面内离散点表示不同极化状态下估计的相干

性,直线为相干性拟合直线。图 7(a)为森林区域,属于体散射,不同极化状态估计的相干性符合近似直线分布;图 7(b)、图 7(c)为草地和建筑区域,属于地面散射,不同极化状态的相干性分布近似为点状,分布较集中,但是建筑区域的相干性较

高。从图 7 可以看出,自适应精致极化 Lee 滤波估计的不同极化状态下的相干性符合地物的散射特性,保持了数据的极化信息。

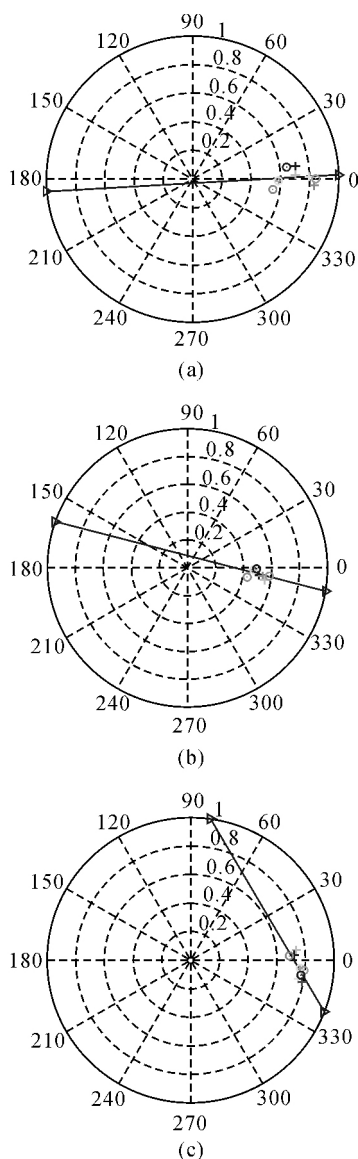


图 7 森林、草地和建筑区不同极化状态相干性分布  
Fig. 7 Coherence distributed in the complex plan from forest, grass and building area

## 5 结 论

PolInSAR 植被参数反演是以复相干性估计为基础,不同窗口大小和形状决定相干性估计的样本数量和质量,区分窗口范围内的同质区域和异质区域是相干性估计的前提。本文根据边缘检测和相似性矩阵对样本进行检测,设立阈值条件建立同质与异质区域的判断准则,可以有效地抑制噪声影响,保持地物的极化特性。窗口大小可以根

据极化 SAR 图像特征和相似性大小自动调整,在一定程度上提高了算法的适应能力。本文算法的窗口形状与精致 Lee 滤波相似,即在确定的窗口范围内选择同质像元,未能充分应用图像的冗余信息,需要进一步研究将同质区域的选择范围从局部区域延伸至非局部区域,而且自适应精致极化 Lee 滤波方法是以乘性斑点噪声模型为基础,对于非乘性噪声模型的实用性也需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] CLOUDE S R. Polarisation: Applications in Remote Sensing [M]. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [2] LEE J S, GRUNES M R, De GRANDI G. Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2363-2373.
- [3] VASILE G, TROUVE E, CIUC M, et al. Intensity-driven-adaptive-neighborhood Technique for PolSAR Parameters Estimation [C] // Proceedings of the 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul: IEEE, 2005, 8: 5509-5512.
- [4] VASILE G, TROUVE E, LEE J S, et al. Intensity-driven Adaptive-neighborhood Technique for Polarimetric and Interferometric SAR Parameters Estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(6): 1609-1621.
- [5] VASILE G, OVARLEZ J, PASCZL F, et al. Coherency Matrix Estimation of Heterogeneous Clutter in High-Resolution Polarimetric SAR Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 1809-1826.
- [6] LEE J S, CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P, et al. Speckle Filtering and Coherence Estimation of Polarimetric SAR Interferometry Data for Forest Applications [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2254-2263.
- [7] LI Ying, ZHENG Yongguo. An Improved Enhanced Lee Filter Algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(7): 243-245. (李莹, 郑永果. 一种改进的增强 Lee 滤波算法 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(7): 243-245.)
- [8] OUYANG Qundong, WU Zhaocong, PENG Jianguai. An Improved Method of Lee Refined Polarized Filter [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(5): 136-138. (欧阳群东, 巫兆聪, 彭检贵. 一种改进的精致极化 Lee 滤波算法 [J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 136-138.)
- [9] LANG Fengkai, YANG Jie, LI Deren. An Adaptive Enhanced Lee Speckle Filter for Polarimetric SAR Image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(7): 690-697. (郎丰铠, 杨杰, 李德仁. 极化 SAR 图像自适应增强 Lee 滤波算法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(7): 690-697.)



- [10] FLYNN T, TABB M, CARANDE R. Coherence Region Shape Extraction for Vegetation Parameter Estimation in Polarimetric SAR Interferometry[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. Toronto, Ontario; IEEE, 2002, 5: 2596-2598.
- [11] TABB M, ORREY J, FLYNN T, et al. Phase Diversity: A Decomposition for Vegetation Parameter Estimation Using Polarimetric SAR Interferometry[C]//Proceedings of EUSAR. Cologne: [s. n.], 2002, 2: 721-724.
- [12] LEE J S, POTTIER E. Polarimetric Radar Imaging: From Basic to Applications[M]. New York: CRC Press, 2009.
- [13] JIANG Yong, ZHANG Xiaoling, SHI Jun. Speckle Reduction for Polarimetric SAR Images by Improved Lee Filter[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(1): 5-8. (江勇, 张晓玲, 师君. 极化 SAR 改进 Lee 滤波相干斑抑制研究[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(1): 5-8. )
- [14] YANG Dahai, MA Debao. Refined Polarimetric SAR Speckle Lee Filtering Algorithm Based on Relativity of Polarization Vector[J]. Journal of Information Engineering University, 2011, 11(6): 737-740. (杨大海, 马德宝. 基于极化矢量相似系数的极化 Lee 滤波改进算法[J]. 信息工程大学学报, 2011, 11(6): 737-740. )
- [15] CLOUDE S R, PAPATHANASSIOU K P. Polarimetric SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [16] LOPEZ-MARTINEZ C, FABREGAS X. Model-based Polarimetric SAR Speckle Filter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3894-3907.
- [17] TAN Lulu, CHEN Bing, YANG Ruliang. Improved Three-stage Algorithm of Tree Height Retrieval with PolInSAR Data[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 996-999. (谈璐璐, 陈兵, 杨汝良. 利用 PolInSAR 数据反演植被高度的改进三阶段算法[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 996-999. )
- [18] NEUMANN M, REIGBER A, FERRO-FAMIL L. PolInSAR Coherence Set Theory and Application[C]//Proceedings of the European Conference on Synthetic Aperture Radar. Dresden: [s. n.], 2006.
- [19] YANG Jie, ZHAO Lingli, SHI Lei, et al. Interpretation of Oblique Buildings Based on Optimal Polarimetric Coherence Coefficient[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(4): 577-583. (杨杰, 赵伶俐, 史磊, 等. 基于最优极化相干系数的倾斜建筑物解译研究[J]. 测绘学报, 2012, 41(4): 577-583.
- [20] GU Jing, YANG Jian, ZHANG Hao, et al. Speckle Filtering in Polarimetric SAR Data Based on the Subspace Decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1635-1641.

(责任编辑:张艳岭)

收稿日期: 2014-09-18

修回日期: 2015-07-30

第一作者简介: 龙江平(1982—),男,博士,研究方向为极化 SAR 和极化干涉 SAR 数据处理和应用。

First author: LONG Jiangping(1982—),male, PhD, majors in PolSAR and PolInSAR data processing and application.

E-mail: longjiangping11@163.com

## (上接第 1313 页)

- [16] ZHANG Xiaohong, GUO Fei, LI Xingxing, et al. Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(1): 9-12. (张小红, 郭斐, 李星星, 等. GPS/GLONASS 组合精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(1): 9-12)
- [17] LI Pan, ZHANG Xiaohong. Integrating GPS with GLONASS to Accelerate Convergence and Initialization Times of Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2014, 18(3): 461-471.
- [18] CAI Changsheng, GAO Yang. Modeling and Assessment of Combined GPS-GLONASS Precise Point Positioning[J]. GPS Solutions, 2013, 17(2): 223-236.
- [19] CHEN Junping, XIAO Pei, ZHANG Yize, et al. GPS-GLONASS System Bias Estimation and Application in GPS-GLONASS Combined Positioning[C]//SUN Jiadong, JIAO Wenhai, WU Haitao, et al. Lecture Notes in Electrical Engineering: China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings, 2013, 244: 323-333.
- [20] ZHANG Xiaohong, ZUO Xiang, LI Pan, et al. Convergence Time and Positioning Accuracy Comparison between BDS and GPS Precise Point Positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256. (张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256. )
- [21] CHEN Junping, ZHANG Yize, WANG Jungang, et al. A Simplified and Unified Model of Multi-GNSS Precise Point Positioning[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1): 125-134. (责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2014-11-03

修回日期: 2015-06-09

第一作者简介: 任晓东(1988—),男,博士生,研究方向为 GNSS 精密定位、电离层建模及应用。

First author: REN Xiaodong (1988—), male, PhD candidate, majors in precise point positioning(PPP), ionosphere modeling and application.

E-mail: xdren@whu.edu.cn