

利用 FB-MAPES 算法估计 Tomography SAR 高度维信号源数

任笑真^{①②} 杨汝良^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 层析成像合成孔径雷达(Tomography SAR)结合空间谱估计技术解决层叠效应时, 首先要估计出高度维信号源数目, 信号源数估计得正确与否直接关系到后续处理的估计性能。用传统的信息论方法估计时, 由于数据受乘性噪声影响, 估计性能下降。该文提出一种新的信号源数估计方法: 双向平滑多视幅相估计(FB-MAPES)滤波器算法。通过 Monte Carlo 仿真对信息论方法中的 GMDL 算法和 FB-MAPES 方法的估计性能进行了比较, 试验结果表明该文提出的方法能够更好地适应乘性噪声的影响, 因而在估计 Tomography SAR 高度维信号源数时性能优于传统的信息论方法。

关键词: 层析成像合成孔径雷达; 信息论方法; 双向平滑多视幅相估计滤波器

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1669-05

On Detection of Number of Tomography SAR Signals in the Elevation Direction Using the FB-MAPES Method

Ren Xiao-zhen^{①②} Yang Ru-liang^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: When using Tomography SAR combined with spatial spectrum estimation to solve layover effect, the number of signals should be estimated in the elevation direction first. The accuracy of number of signals is directly related to the following estimation performance. The conventional Information Theoretic Criteria (ITC) methods are usually influenced by multiplicative noise of the data, consequently, the performance of the estimation decreases. In this paper, a new method, FB-MAPES, is proposed to detect the number of signals. Then the performance of General Minimum Description Length (GMDL) and FB-MAPES is compared via the Monte Carlo simulation. The experimental results confirm the validity of the FB-MAPES method. Moreover, the proposed method is prior to conventional ITC in detecting the number of tomography SAR signals in the elevation direction.

Key words: Tomography SAR; Information Theoretic Criteria (ITC); Multilook amplitude and phase estimation filter with forward-backward averaging

1 引言

传统的干涉 SAR(InSAR)能够获得地表的高程信息。当观测区域出现斜坡或者表面不连续时, InSAR 就会出现层叠效应, 导致 InSAR 的地形高度图出现严重的扭曲。层析成像 SAR(Tomography SAR)能够分离映射到同一个距离-方位分辨单元的不同散射体, 获得高度维信息, 克服层叠效应的影响^[1,2]。近年来已有学者利用 Tomography SAR 结合空间谱估计技术来解决层叠效应^[3,4], 它可以分为两步: 第 1 步估计信号源数目, 第 2 步恢复各信号源的参数。相关文献大都只处理第 2 步, 即在直接假定信号源数目已知的条件下来估计信号源的参数信

息, 而关于如何获得 Tomography SAR 高度维信号源数目的方法却研究的很少。在实际应用场合, 信号源数是需要估计的。当估计的信号源数与真实的信号源数不一致时往往会对真实信号的参数估计(幅度和相位)产生严重的影响, 因此信号源数目估计得正确与否直接决定了后续处理的估计性能。

目前有关 Tomography SAR 高度维信号源数的估计方法主要为信息论估计法^[5-7], 文献[5]描述了用不同信息论方法估计 Tomography SAR 高度维信号源数时的性能, 文献[6,7]分别使用信息论方法中的 AKaike 信息论准则(AIC)和有效检测准则(EDC)来估计信号源数。信息论方法通过所获得数据协方差矩阵的分解, 分离开大小特征值, 利用小特征值(即噪声特征值)来估计信号源数目, 只能对独立信

号源的总数做出估计。而 Tomography SAR 数据被相干斑噪声(乘性噪声)污染,引起信号特征值谱改变,信息论方法处于模型失配的条件下,估计性能下降。

由上述信息论方法在估计 Tomography SAR 高度维信号源数时的不足,本文提出一种新的信号源数估计方法:利用 FB-MAPES(双向平滑多视 APES)估计信号源数的方法。通过模拟仿真和信息论方法(GMDL 算法)进行比较,结果表明本文所提出的方法能够更好地适应乘性噪声的影响,估计性能优于信息论方法。

2 Tomography SAR 数据模型

Tomography SAR 的 K 个相位中心排列成一个均匀线性阵^[8]。阵列中第一个和最后一个相位中心的距离表示基线长度 B ,当成像区域存在层叠效应时,天线的 K 个相位中心分别获得的 N 视复图像可表示为

$$\mathbf{y}(n) = \sum_{m=1}^{N_s} \sqrt{\tau_m} \mathbf{x}_m(n) \Theta \mathbf{a}(\varphi_m) + \mathbf{v}(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中, $\mathbf{y}(n)$, $\mathbf{x}_m(n)$, $\mathbf{a}(\varphi_m)$ 和 $\mathbf{v}(n)$ 是 K 维向量, Θ 是 Hadamard 积, N 是视数, N_s 表示散射源个数。 τ_m 表示第 m 个散射源的雷达反射率。 $\{\mathbf{x}_m(n)\}_{n=1}^N$ 是相应于第 m 个源的相干斑复向量^[9]。 $\mathbf{a}(\varphi_m)$ 是第 m 个散射源的导向矢量, φ_m 是基线为 B 时相应的相干角,也就是两个最远相位中心之间的相位差。干涉相位 φ_m 和空间频率 ω_m 之间的关系为 $\varphi_m = (K-1)\omega_m$, 和视线角 θ_m 的关系为 $\varphi_m = (K-1)\omega_m = 4\pi B \cos(\varepsilon - \theta_m) / \lambda$, 其中 λ 表示雷达波长, ε 为基线倾斜角。 $\mathbf{v}(n)$ 表示均值为零,方差为 σ_v^2 的空间高斯白噪声。

本文的工作就是在从被乘性噪声污染的 Tomography SAR 数据 $\mathbf{y}(n)$ ($n = 1, 2, \dots, N$) 中获得信号源数目 N_s 的估计。

3 General Minimum Description Length (GMDL) 算法

信息论方法是最常用的信号源数估计方法,它有一个统一的表达形式^[10]:

$$J(\hat{n}) = \arg \min_n -L(\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}) + p(n) \quad (2)$$

其中 $L(\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}) = \log f_y(\mathbf{y} | \hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)})$ 是对数似然函数, $\hat{\boldsymbol{\theta}}^{(n)}$ 表示未知参数向量的极大似然估计, $p(n)$ 是罚函数。

文献[10]描述了用信息论方法估计信号源数时的一般渐进性能,指出适当利用阵列结构的先验信息能够提高 MDL 估计器的性能,由假设信号源是复高斯随机过程,噪声是服从均值为零,协方差矩

阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}$ 的高斯白噪声,导向矩阵满秩,推导出了 GMDL 估计器。分析表明 GMDL 估计器的性能对信号源的实际分布并不是非常敏感,因此这里采用 GMDL 算法来与本文所提出的算法进行比较。由文献[10]得到 GMDL 算法表达式如下:

$$\text{GMDL}(n) = -N \log A(n) + 0.5 [n(2K - n) + 1] \log N \quad (3)$$

其中

$$A(n) = \frac{\prod_{i=n+1}^K \lambda_i}{\left(\frac{1}{K-n} \sum_{i=n+1}^K \lambda_i \right)^{K-n}}$$

式中 K 为相位中心数, λ_i ($i = 1, 2, \dots, K$) 为数据协方差矩阵特征值, N 为视数。因此 GMDL 准则下估计的信号源数为

$$\hat{N}_s = \arg \min_n \text{GMDL}(n) \quad (4)$$

4 FB-MAPES 算法

根据阵列信号处理理论,阵列所能检测到的信号源数目不超过阵列的阵元数,因此 K 次航过的 Tomography SAR 所能检测到的高度维信号源数目最多为 $K-1$ 个,若能正确估计出这 $K-1$ 个峰值,即估计出各散射源的雷达反射系数,则可以通过一定的准则设置判决门限,取大于判决门限值的雷达反射系数对应相应的信号源,而小于判决门限的反射系数值对应噪声信号。由此本文所提出的信号源数估计方法可描述为两个步骤:(1)先检测出信号功率谱的所有谱峰(2)设置门限值,大于门限的峰值个数即为所要估计的信号源个数。

由上面的分析可以看出选用合适的谱估计方法,正确地估计谱峰至关重要。本文利用双向平滑多视幅相估计(FB-MAPES)滤波器来估计雷达的反射系数,APES 算法由 Li 和 Stoica 在文献[11]中提出, Gini 将 APES 算法扩展到多视场景^[12],但该文中对数据协方差矩阵采用的是前向空间平滑,双向平滑阵列孔径损失要比单向平滑小且能够提高分辨率^[13],因此这里把 APES 算法扩展为双向平滑多视 APES。该滤波器的设计准则为,数据通过前向和后向滤波后的输出结果尽可能接近频率为 w 的正弦信号。令数据前向平滑时子向量为 $\mathbf{y}(i, n) = [\mathbf{y}_i(n) \mathbf{y}_{i+1}(n) \dots \mathbf{y}_{i+M-1}(n)]^T$, 后向平滑时子向量为 $\tilde{\mathbf{y}}(i, n) = [\mathbf{y}_{N-i-1}^*(n) \mathbf{y}_{N-i-2}^*(n) \dots \mathbf{y}_{N-i-M}^*(n)]^T$, $i = 1, 2, \dots, L$, $n = 1, 2, \dots, N$, M 为滤波器长度,其中 $\mathbf{y}_i(n)$ 为第 n 视数据 $\mathbf{y}(n)$ 的第 i 个元素, $\mathbf{y}_i^*(n)$ 为 $\mathbf{y}_i(n)$ 的共轭, $L = K - M + 1$, $1 \leq M \leq K$ 。

FB-MAPES 用数学公式描述如下:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{h}_{\text{FB-MAPES}} &= \arg \min_{h, \alpha, \beta} \frac{1}{2NL} \\ &\cdot \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^L \left\{ \left| \mathbf{h}^H \mathbf{y}(i, n) - \alpha(n) e^{j(i-1)w} \right|^2 \right. \\ &\left. + \left| \mathbf{h}^H \tilde{\mathbf{y}}(i, n) - \beta(n) e^{j(i-1)w} \right|^2 \right\} \\ \mathbf{h}^H \mathbf{a}(w) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{a}(w) = [1 \ e^{jw} \ \dots \ e^{j(M-1)w}]^T$ 。

直接计算式(5)可将代价函数重记为

$$\left. \begin{aligned} \min_h \mathbf{h}^H \hat{\mathbf{Q}}(w) \mathbf{h} \\ \mathbf{h}^H \mathbf{a}(w) = 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中

$$\hat{\mathbf{Q}}(w) = \frac{1}{2}(\hat{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{R}}) - \frac{1}{2}(\mathbf{g}(w)\mathbf{g}^H(w) + \tilde{\mathbf{g}}(w)\tilde{\mathbf{g}}^H(w)) \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\mathbf{R}}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{y}(i, n) \mathbf{y}^H(i, n) \right) \quad (8)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathbf{R}}_n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \tilde{\mathbf{y}}(i, n) \tilde{\mathbf{y}}^H(i, n) \right) \quad (9)$$

$$\mathbf{g}(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{g}_n(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \mathbf{y}(i, n) e^{-j(i-1)w} \right) \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{g}}(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathbf{g}}_n(w) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \tilde{\mathbf{y}}(i, n) e^{-j(i-1)w} \right) \quad (11)$$

将式(7)-式(11)代入式(6)用拉格朗日常数法求解得到

$$\mathbf{h}_{\text{FB-MAPES}} = \frac{\hat{\mathbf{Q}}^{-1}(w) \mathbf{a}(w)}{\mathbf{a}^H(w) \hat{\mathbf{Q}}^{-1}(w) \mathbf{a}(w)} \quad (12)$$

由上面的推导可得 FB-MAPES 滤波器输出的功率谱为

$$\begin{aligned} \hat{P}_{\text{FB-MAPES}}(w) &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\hat{\alpha}(n, w)|^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \frac{\mathbf{a}^H(w) \hat{\mathbf{Q}}^{-1}(w) \mathbf{g}_n(w)}{\mathbf{a}^H(w) \hat{\mathbf{Q}}^{-1}(w) \mathbf{a}(w)} \right|^2 \end{aligned} \quad (13)$$

然后通过搜索把 FB-MAPES 功率谱的所有谱峰确定出来, 假设有 p 个峰值, 记为 $\text{peak} = (\text{peak}_1, \text{peak}_2, \dots, \text{peak}_p)$ 。Tomography SAR 高度维数据代表的是场景本身的后向散射系数, 它可由分布目标模型来近似, 即有许多后向散射特性大体相同的散射体组成的目标区域, 一般情况下并没有突出的强散射体, 主要由漫散射体组成。因此各散射体的后向散射系数相差不会特别的大, 通过峰值归一化处理, 设定门限值为 $0.1 \max(\text{peak})$, 把小于门限的峰值判定为噪声剔除, 则大于门限的峰值个数即为 Tomography SAR 高度维信号源数。

5 模拟仿真和性能分析

信号源数目的估计问题中一般以最大成功概率来判断一个算法的性能^[10], 因此这里定义成功概率 $p_d = P(\hat{N}_s = N_s)$, 即正确估计的概率; 虚警概率 $p_{\text{fa}} = P(\hat{N}_s > N_s)$, 即估计的信号源数大于真实数的概率; 漏警概率 $p_m = P(\hat{N}_s < N_s)$, 即估计的信号源数小于真实数的概率。其中 $p_e = p_{\text{fa}} + p_m$ 为错误估计的概率。由相同条件下成功概率的大小判断一个算法性能的优劣。

本文将 GMDL 和 FB-MAPES 方法应用于 Tomography SAR 高度维数据模型, 估计高度维信号源数, 并将 GMDL 和 FB-MAPES 方法的估计性能进行了比较。模拟所使用的参数为信号源数目 $N_s = 2$, 干涉相位分别为 $\varphi_1 = 140^\circ$, $\varphi_2 = -270^\circ$, 视数 $N = 32$, 归一化基线 $b_1 = b_2 = 0.2$, 两信号源信噪比 $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 12$ dB, 其中 SNR_m 表示第 m 个信号源的信噪比 $\text{SNR}_m = \tau_m / \sigma_v^2$, 相位中心数 $K = 8$, FB-MAPES 滤波器长度 $M = K - 1$, 两信号源间隔 $\Delta\varphi = 410^\circ$, 下面分别改变视数、归一化基线、信噪比和干涉相位差的取值来比较这两种方法的正确估计概率。所有的实验结果均通过 500 次 Monte Carlo 实验得出。

多视处理能够降低相干斑噪声(乘性噪声)的影响, 这里通过改变 Tomography SAR 各相位中心获得的复图像视数的多少来研究视数对估计性能的影响。由图 1 可以看出 GMDL 和 FB-MAPES 方法的正确估计概率都随视数增加而增大, 但 FB-MAPES 方法的正确估计概率总是大于 GMDL 算法。尤其在视数较少时, GMDL 算法受乘性噪声影响较大, 虚警概率很高, 几乎无法正确估计。

当后向散射源为点目标, 也就是乘性噪声完全相关的条件下, 归一化基线趋于零, 信号子空间和噪声子空间可以很清楚地区分开。随着归一化基线的增大, 协方差矩阵受乘性扰动影响越大, 大小特

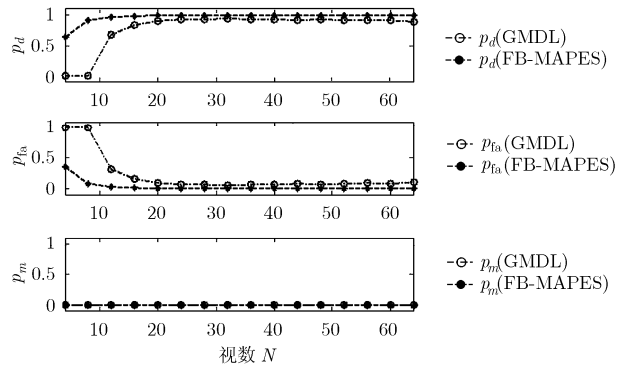


图 1 GMDL 和 FB-MAPES 随视数 N 变化的估计性能

征值不能明显区分, ITC 算法性能下降很大。图 2 描述了归一化基线变化对两种算法估计性能的影响。令归一化基线 b_2 保持不变, b_1 从 0.1 增大到 1, 由图 2 可以看出对于 Tomography SAR 来说, 由于获得的数据存在乘性噪声, 而 b_1 越大代表乘性噪声带宽越宽^[1], 信号子空间能量向噪声子空间泄漏, 导致信号和噪声特征值不能明显区分, 当 $b_1 > 0.6$ 时 GMDL 算法正确估计概率下降很快, 漏警概率增大。而 FB-MAPES 算法能够更好地适应乘性噪声的影响, 估计性能优于 GMDL, 即使在 $b_2=1$ 时的正确估计概率也达到了 0.9 以上。

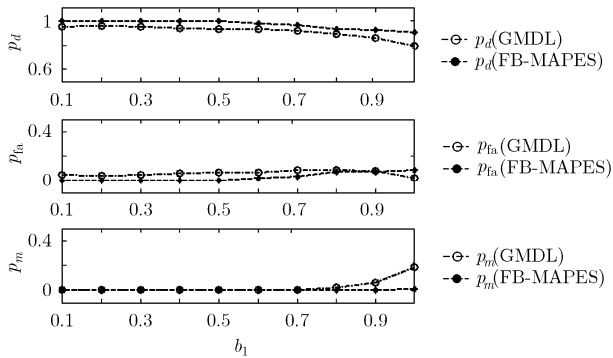


图 2 GMDL 和 FB-MAPES 随 b_1 变化的估计性能

图 3 描述了信噪比变化对 GMDL 和 FB-MAPES 算法估计性能的影响。保持 $\text{SNR}_2 = 12$ dB 不变, 令 SNR_1 从 0 dB 增加到 21 dB, 有图 3 可以看出即使当 SNR_1 达到 20 dB 时 FB-MAPES 算法依然可以很好的估计出 Tomography SAR 高度维信号源数目。而 GMDL 算法随着 SNR_1 的增大估计性能下降很快, 虚警概率增大。这是因为随着信噪比增强, 乘性噪声引起的特征值泄漏也随之增加, 引起基于特征值估计的信息论方法性能下降。

图 4 描述了信源间距变化对这两种算法估计性能的影响。由图看出在两信号源相距较近时 FB-MAPES 的估计性能不如 GMDL, 这是因为空间谱

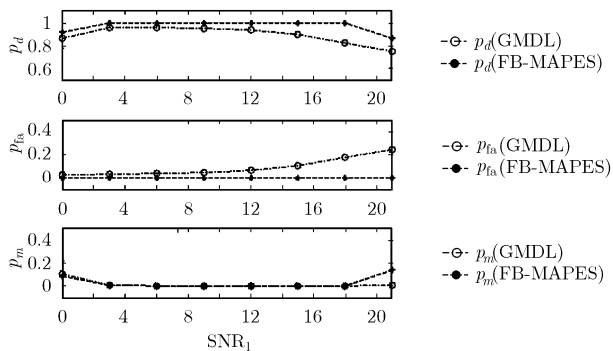


图 3 GMDL 和 FB-MAPES 随 SNR_1 变化的估计性能

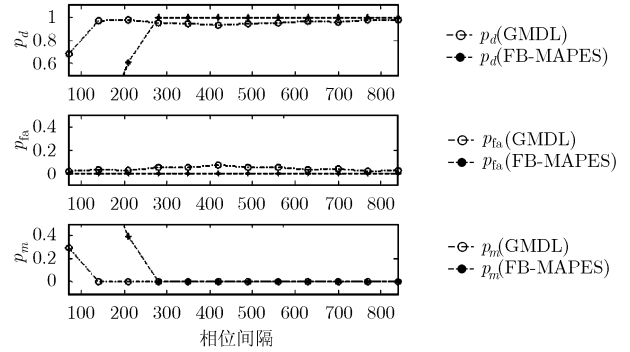


图 4 GMDL 和 FB-MAPES 随相位间隔 $\Delta\phi$ 变化的估计性能

估计技术受自身分辨率的限制, 在两信号源相干相位小于可分辨角度时, 两信号源的主瓣合成一个, 因而无法区分, 但是一旦两信号源可区分, 那么 FB-MAPES 的检测性能将比 GMDL 的性能好。

6 结论

Tomography SAR 结合空间谱估计技术解决层叠效应, 首先要正确估计出同一方位-距离分辨单元中高度维信号源数目, 这关系到后续处理的估计性能, 应引起足够的重视。本文使用 GMDL 和 FB-MAPES 两种方法来进行估计, 并分别通过视数、归一化基线、信噪比和干涉相位差的变化来获得这两种方法的正确估计概率, 并给出了详细的比较和实验结果。由上面的分析得出, 实际的 Tomography SAR 高度维数据受相干斑噪声(乘性噪声)影响, 数据协方差矩阵的特征值谱改变, 因而用基于特征值估计的信息论方法时模型失配, 估计性能下降。而本文所提出的利用空间谱估计 FB-MAPES 算法估计信号源数的方法能够更好地适应乘性噪声的影响, 通过 Monte Carlo 仿真和改进的 MDL 算法(GMDL 算法)进行比较, 试验结果表明本文所提出的方法性能优于传统的信息论估计法。

参考文献

- [1] Reigber A and Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [2] Lombardini F, Pardini M, and Gini F. Sector interpolation for 3D SAR imaging with baseline diversity data. *Proceedings of IEEE 2007 Waveform Diversity and Design Conference*, Pisa, Jun 2007: 297-301.
- [3] Fornaro G, Pauciuolo A, and Serafino F. Multipass SAR processing for urbanized areas imaging and deformation monitoring at small and large scales. *Proceedings of IEEE 2007 Urban Remote Sensing Joint Event*, Paris, Apr 2007.
- [4] Gini F, Lombardini F, and Montanari M. Layover solution in

- multibaseline SAR interferometry. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(4): 1344–1356.
- [5] Lombardini F and Gini F. Model order selection in multibaseline interferometric radar systems. *EURASIP Journal on Applied Signal Processings*, 2005, 20(20): 3206–3219.
- [6] Gianfranco F and Serafino F. Imaging of single and double scatterers in urban areas via SAR tomography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3497–3505.
- [7] Lombardini F, Rößing L, and Ender J, *et al.* Towards a complete processing chain of multibaseline airborne InSAR data for layover scatterers separation. Proceedings of IEEE 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, Apr 2007.
- [8] Sauer S, Ferro-Famil L, and Pottier E, *et al.* 3D visualisation and physical feature extraction of urban areas using multibaseline POL-InSAR data at L-band. Proceedings of IEEE 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, Apr 2007.
- [9] Lopes A, Nezry E, and Goze S, *et al.* Adaptive processing of multilook complex SAR images. Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, TX, 1992: 890–892.
- [10] Fishler E and Messer H. Detection of signals by information theoretic criteria: General asymptotic performance analysis. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(5): 1027–1036.
- [11] Stoica P, Li H, and Li J. A new derivation of the APES filter. *IEEE Signal Processing Letters*, 1999, 6: 205–206.
- [12] Gini F and Lombardini F. Multilook APES for multibaseline SAR interferometry. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(7): 1800–1803.
- [13] Delis A and Papadopoulos G. Enhanced forward/backward spatial filtering method for DOA estimation of narrowband coherent sources. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1996, 143(1): 10–16.
- 任笑真: 女, 1984年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达三维成像技术研究.
- 杨汝良: 男, 1943年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为机载及星载合成孔径雷达系统、小卫星合成孔径雷达系统等.