

# 频谱分析技术在层析 SAR 森林垂直结构 信息提取中的应用性能分析

李文梅<sup>1,2</sup>, 陈尔学<sup>2</sup>, 李增元<sup>2</sup>, 冯琦<sup>2</sup>, 杨浩<sup>3</sup>, 黎晓<sup>4</sup>

(1. 南京邮电大学地理与生物信息学院, 江苏南京 210046; 2. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091;  
3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 4. 西安科技大学, 陕西西安 710054)

**摘要:** 为了分析频谱分析在不同应用场景的信号提取能力, 分别应用数值模拟与真实林区的多基线 InSAR 数据分析五种频谱分析方法的提取效果. 数值模拟实验表明, Capon 方法受信噪比影响较小; 在 TSAR 林区实验中, Capon 方法提取森林垂直结构信息效果最优, NSF 方法提取冠层高度及地表信息效果最优.

**关键词:** 合成孔径雷达; 层析合成孔径雷达; 波束成形; Capon; 多重信号分类; 加权信号子空间匹配; 加权噪声子空间匹配; 森林垂直结构

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2015)04-0694-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.04.010

## Application Performance Analysis of Spectral Analysis Techniques in Forest Vertical Structure Information Extraction Using Tomographic SAR

LI Wen-mei<sup>1,2</sup>, CHEN Er-xue<sup>2</sup>, LI Zeng-yuan<sup>2</sup>, FENG Qi<sup>2</sup>, YANG Hao<sup>3</sup>, LI Xiao<sup>4</sup>

(1. School of Geography and Biological Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China;

2. Institute of Forest Resource Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Beijing Agricultural Information Technology Research Center, Beijing 100097, China;

4. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** In order to analyze the application effect of spectral analysis techniques in different scenes and provide an optimal one for forest applications, numerical simulations and multi-baseline interferometric synthetic aperture radar (InSAR) data in forest scenario were used to analyze the extraction result using five spectral analysis techniques. It is discovered that, signal to noise ratio (SNR) has little effect on Capon method, and has greater impact on weighted noise subspace fitting estimator (NSF), multiple signal classification (MUSIC) and weighted signal subspace fitting estimator (SSF) method. In tomographic SAR (TSAR) experiment, Capon method has best result in forest canopy/vertical structure information extraction. NSF method has best result in canopy height and topographic information extraction followed by MUSIC. This experiment provided a reference for spectral analysis technique choice in forest information extraction using multi-baseline TSAR.

**Key words:** SAR; tomographic SAR (TSAR); beamforming; Capon; multiple signal classification (MUSIC); weighted signal subspace fitting estimator (SSF); weighted noise subspace fitting estimator (NSF); forest vertical structure

## 1 引言

森林垂直结构信息提取是层析合成孔径雷达 (Tomographic Synthetic Aperture Radar, TSAR) 研究的重要专题, 但由于 TSAR 构建过程中多基线重轨飞行难以保证基线等距, 直接应用多基线干涉合成孔径雷达 (Interferometric

Synthetic Aperture Radar, InSAR) 数据很难实现垂直结构信息提取<sup>[1~4]</sup>. 应用频谱分析技术提高 TSAR 垂直方向分辨能力已经被应用于城市<sup>[5,6]</sup>、森林垂直结构信息提取<sup>[7]</sup>. 目前这些研究主要集中于应用数值模拟实验来改进频谱分析技术, 以获得更好的信号识别效果<sup>[8,9]</sup>和应用某种频谱分析技术来实现城市、森林 3D 信息提取<sup>[10]</sup>.

然而,在复杂场景(如森林)中何种频谱分析技术适用于提取何种垂直结构信息的研究相对较少.不同信噪比条件下,频谱分析方法的适用性也缺乏研究.因此,本文针对目前这种情形,分别应用数值模拟与森林场景 E-SAR 机载多基线 InSAR 数据来分析 Beamforming, Capon, MUSIC, SSF, NSF 五种常见的频谱分析方法的信号识别能力及适用于提取何种信息,以便为后续 TSAR 提取森林垂直结构信息奠定基础.

## 2 多基线 TSAR

机载多基线 TSAR 是 Reigber<sup>[11]</sup>于 2000 年应用多基线 L 波段数据集首次提出的.多基线 TSAR 的优势是所有飞行路线为直线,层析处理的大部分内容可以简化为传统 2D 处理,使得航线设计和数据处理的相关技术可以重新应用于 TSAR.其数据获取几何布局如图 1(a)所示.假设基线均匀分布并忽略与入射角关联的投影,简化后的层析成像几何结构如图 1(b)所示,图中法向与垂直方向一致.

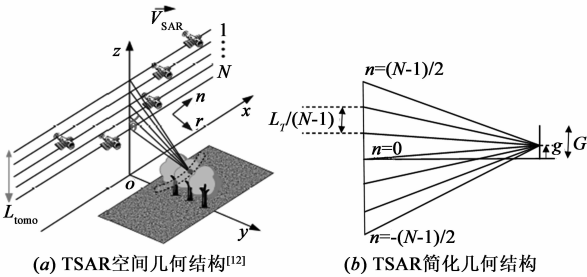


图1 TSAR数据获取几何布局

假设散射体位于高度  $n_0$  处,传感器位置与散射体之间的距离为  $R$ ,接收的信号可以表示为:

$$s(z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) * \exp\{-j2kR(z, n_0)\}$$

$$\text{式中, } R(z, n_0) = \sqrt{r_0^2 + (z - n_0)^2} \approx r_0 + \frac{(z - n_0)^2}{2r_0} \quad (1)$$

其中,  $r_0$  为传感器与散射体之间的最小距离,  $a(x_0, r_0, n_0)$  为位置  $(x_0, r_0, n_0)$  处散射体的复反射率,  $*$  表示散射回波与 TSAR 系统脉冲响应之间的卷积.经过解调、去斜后得到的信号为:

$$s_{\text{dr}}(z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) * \exp\{-jk \frac{(n_0^2 - 2zn_0)}{r_0}\} \quad (2)$$

此时,垂直波数  $k_z$  为  $k_z(n_0) = \frac{\partial \arg(s_{\text{dr}})}{\partial z} = \frac{2kn_0}{r_0}$ . 从去斜后的  $k_z$  表达式可以看出,垂直波数与垂直方向位置  $z$  无关,仅依赖于高度为  $H_V$  的体散射内部散射高度  $n_0$ . 然后,对  $z$  方向的去斜信号  $s_{\text{dr}}(z, n_0)$  应用快速傅里叶变换(FFT),散射体的聚焦影像可以表示为:

$$S_{\text{dm}}(k_z, n_0) = a(x_0, r_0, n_0) L_{\text{tomo}} \exp\{-jk \frac{n_0^2}{r_0}\} \text{sinc}(kL_{\text{tomo}} \frac{(n_0 - n)}{n}) \quad (3)$$

层析分辨率取决于 sinc 函数的宽度,即

$$\delta_z = \frac{\lambda r_0}{2L_{\text{tomo}}} \quad (4)$$

式中,  $L_{\text{tomo}}$  为层析孔径等于多基线 TSAR 构架中最大基线长度(如图 1(a)). 为了避免高度向模糊,应该在满足垂直带宽奈奎斯特采样规则的条件下对  $L_{\text{tomo}}$  进行适当的采样.垂直带宽可以由垂直波数表示为:

$$B_{\text{vb}} = \frac{k_z(n_0)}{2\pi} = \frac{2H_V}{\lambda r_0} \quad \text{with } n_0 \in [H_{\text{min}}, H_{\text{max}}], H_V = H_{\text{max}} - H_{\text{min}} \quad (5)$$

因此,层析孔径的采样距离范围为:

$$d_s \leq \frac{1}{B_{\text{vd}}} = \frac{\lambda r_0}{2H_V} \quad (6)$$

采样距离取决于观测目标体散射的总高度  $H_V$ . 假设所有的轨道以基线距离  $d_s$  均匀分布,层析分辨率  $\delta_z$  直接与采集数据的次数成反比.这一事实限制了几何层析分辨率的提高,因为大量采集数据需要高昂的实验代价.而且在实际飞行实验中,很难实现重轨数据采集轨道均匀分布,轨道分布不均匀是高程模糊的主要原因<sup>[12]</sup>.

## 3 频谱分析技术

### 3.1 Beamforming

Beamforming 即波束成形,是一种通用的信号处理技术,用于控制传播方向和射频信号的接收,常被用于估计波达方向(Directions of Arrival, DOA)<sup>[13]</sup>. Homer 等首次应用 Beamforming 来解决多基线 InSAR 数据集的叠掩问题<sup>[14]</sup>. 假设在空间白噪声场景下,Stoica 和 Moses 将 Beamforming 方法用于空间频率估测并指出其只适合于单源情形,从而导致对高度与反射率的估测出现偏差<sup>[15]</sup>. Beamforming 波谱与接收多基线 InSAR 数据的功率谱密度成正比,如式(7)所示:

$$P_{\text{bf}}(z) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |a^\dagger(z)y(l)|^2 = a^\dagger(z)Ra(z) \quad (7)$$

$D$  个散射体的估测高度  $\hat{z} = [\hat{z}_1, \dots, \hat{z}_D]$  对应于 Beamforming 波谱的最大值.第  $d$  个散射体的反射率由  $P_{\text{bf}}(\hat{z}_d)$  来决定.

### 3.2 Capon

Capon 滤波是为了保留特定的波达方向 DOA 或空间频率并减弱实际回到不同频率阵列的其他信号. Capon 方法曾被用于时间序列、阵列信号处理研究,以及多基线 InSAR 数据处理<sup>[18]</sup>.

在多基线 InSAR 架构中,接收数据的 Capon 频谱可以表示为:

$$P_{cp}(z) = \frac{1}{\mathbf{a}^\dagger(z) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(z)} \quad (8)$$

$D$  个散射体估测的高度对应于 Capon 波谱的  $D$  个最大值的位置. 那么第  $d$  个散射体的反射率估计由  $P_{cp}(\hat{z}_d)$  决定. Gini 和 Lombardini 经过经验研究表明 Capon 方法在空间分辨率和旁瓣抑制方面表现较 Beamforming 方法好. 然而,他们也指出通过 Capon 方法估测得到的幅度(反射率)具有偏差<sup>[16]</sup>.

### 3.3 MUSIC

Multiple Signal Classification (MUSIC)方法是基于矩阵特征分解的一种功率谱估计方法. MUSIC 方法把相关数据矩阵中的信息分类,把信息分配到信号子空间和噪声子空间. 它适合于普遍情况下的正弦信号参数估计方法,能够在偏差和方差方面达到较好的平衡. 与非参数方法如 Beamforming, Capon 方法相比, MUSIC 方法在数据满足基本协方差矩阵模型的条件时表现较好.

多基线 InSAR 中 MUSIC 算法可以表示为:

$$P_{Mu}(z) = \frac{1}{\mathbf{a}(z)^\dagger \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^\dagger \mathbf{a}(z)} \quad (9)$$

式中,  $\hat{\mathbf{E}}_n$  的估测需要对协方差矩阵  $\hat{\mathbf{R}}$  的估测,进而需要大量的观测值. 散射体的高度可通过应用 MUSIC 频谱的  $D$  个最大峰值来估测. 当有大量采样数据时, MUSIC 估测误差呈均值为 0 的高斯分布,其协方差矩阵为:

$$\mathbf{C}_{Mu} = \frac{\sigma_n}{2L} (\mathbf{H} \odot \mathbf{I})^{-1} \Re\{\mathbf{H} \odot (\mathbf{A}^\dagger \mathbf{T}_U \mathbf{A})^T\} (\mathbf{H} \odot \mathbf{I})^{-1} \quad (10)$$

式中,  $\mathbf{T}_U = \mathbf{\Lambda}_s (\mathbf{\Lambda}_s - \sigma_n \mathbf{I}_D)^{-2}$ ;  $\mathbf{H} = \mathbf{D}_A^\dagger \mathbf{P}_A^\perp \mathbf{D}_A$ ;

$$\mathbf{D}_A = \left[ \frac{\partial \mathbf{a}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_1}, \dots, \frac{\partial \mathbf{a}(z)}{\partial z} \Big|_{z=z_D} \right]$$

Gini 和 Lombardini 应用数值分析方法证明即使有乘性噪声的情形下, MUSIC 方法通常也能够得到较好的估测结果<sup>[16]</sup>. 当源信号不相关时, MUSIC 能够获得近似最大似然估计的效果. 当散射体相关时, MUSIC 估计算法的能力降低,如果散射体完全相关,那么由于源信号协方差矩阵未满秩, MUSIC 方法将无法分离这些散射体,信号子空间的特征矢量可能泄漏到了噪声子空间.

### 3.4 WSF

加权子空间匹配估计器 (Weighted Subspace Fitting estimator, WSF) 是通过应用权重矩阵增加子空间匹配估计的自由度以获取特定的估测信息进而得到不同的估测方案<sup>[17]</sup>. WSF 按照所应用的子空间的不同可以分为加权噪声子空间匹配估计 (Weighted Noise Subspace Fitting estimator, NSF) 和加权信号子空间匹配估计 (Weighted Signal Subspace Fitting estimator, SSF).

#### 3.4.1 NSF

NSF 是 WSF 通过将噪声与导向矩阵子空间的正交计算构建子空间匹配的代价函数来最小化未知参数实现的. NSF 表达式为

$$\hat{z} = \arg \min \text{tr}\{\mathbf{A}(z)^\dagger \hat{\mathbf{E}}_n \hat{\mathbf{E}}_n^\dagger \mathbf{A}(z) \mathbf{W}_N\} \quad (11)$$

式中, 权重矩阵  $\mathbf{W}_N$  可以认为是附加自由度, 并且可以调整以获得特定估测特性得到噪声子空间匹配的最小化结果. Stoica 和 Nehorai 研究发现, NSF 方法比其他任何估计器都精确, 但对高相关信号其估计结果表现将降低<sup>[18]</sup>.

#### 3.4.2 SSF

SSF 是应用信号与导向矩阵正交积构建 WSF 中子空间匹配的代价函数来实现的. 其表达式为:

$$\hat{z} = \arg \min \text{tr}\{\mathbf{P}_A^\perp \hat{\mathbf{E}}_s \mathbf{W}_s \hat{\mathbf{E}}_s^\dagger\} \quad (12)$$

其中,  $\mathbf{P}_A^\perp(z) = (\mathbf{I}_{(M \times M)} - \mathbf{A}(z)(\mathbf{A}^\dagger(z)\mathbf{A}(z))^{-1}\mathbf{A}^\dagger(z))$ , 式中  $\mathbf{W}_s$  为信号加权矩阵, 可以通过调整  $\mathbf{W}_s$  获得 SSF 估测的最小值. Stoica 和 Nehorai 曾指出, SSF 方法对高相关信号表现更为突出, 但随着信号之间相关性的降低, 比如林区, SSF 方法难以获取目标有效信息<sup>[18]</sup>.

## 4 结果分析与评价

### 4.1 数值分析与评价

数值分析与评价基于仿真 Capon 波束形成方法, 即在已知有用信号方向的前提下, 通过自相关矩阵的计算求出信号方向的最优权. 为了分析不同频谱分析技术对信号的识别能力, 分别设定两个不同的附加噪声. 接收信号分别为  $x = \sin(2\pi \times 10t) + \sin(2\pi \times 20t) + \text{randn}(\text{size}(t))$ ,  $x = \sin(2\pi \times 10t) + \sin(2\pi \times 20t) + 0.5 \times \text{randn}(\text{size}(t))$ , 其中,  $t = 0:1/t_f:1-1/t_f$ ,  $t_f = 100$ ,  $N(t) = \text{randn}(\text{size}(t))$  是大小为  $\text{size}(t) \times \text{size}(t)$ , 均值为零, 标准差为 1 的高斯白噪声. 分别应用 Beamforming, Capon, MUSIC, SSF 与 NSF 估计器得到功率谱, 为了比较几种不同的频谱分析技术的性能, 将功率谱进行归一化, 如图 2 和图 3 所示. 从图 2 可以发现, 当信噪比较低时, 对于不相干基带信号, 只有 Capon 方法能够正确识别出所有信号位置, MUSIC 方法与 NSF 方法所得功率谱类似, 都只能识别出  $\pm 20^\circ$  处的信号, SSF 方法只能识别出  $\pm 10^\circ$  处的信号, Beamforming 无法正确识别出信号具体位置; Capon 方法与 MUSIC, NSF 和 SSF 相比抑制噪声能力较弱. 从图 3 可以看出, 当信噪比较高时, Capon、MUSIC 和 NSF 三种方法均能正确识别出信号位置; SSF 方法能够大概识别出信号位置, 但对  $\pm 20^\circ$  处信号的识别较差; Beamforming 方法无法准确识别信号位置, 对噪声的抑制有限.

综上,从数值模拟角度来看,Capon 方法在高噪声背景条件下依然能够准确识别信号位置;随着信噪比增加,Capon 方法抑制噪声的能力增强,NSF 与 MUSIC 方法能更

好地抑制噪声并能识别出信号位置,SSF 方法具有较好的噪声抑制能力,但信号识别能力较差. Beamforming 在高低噪声背景条件下都难以准确识别信号.

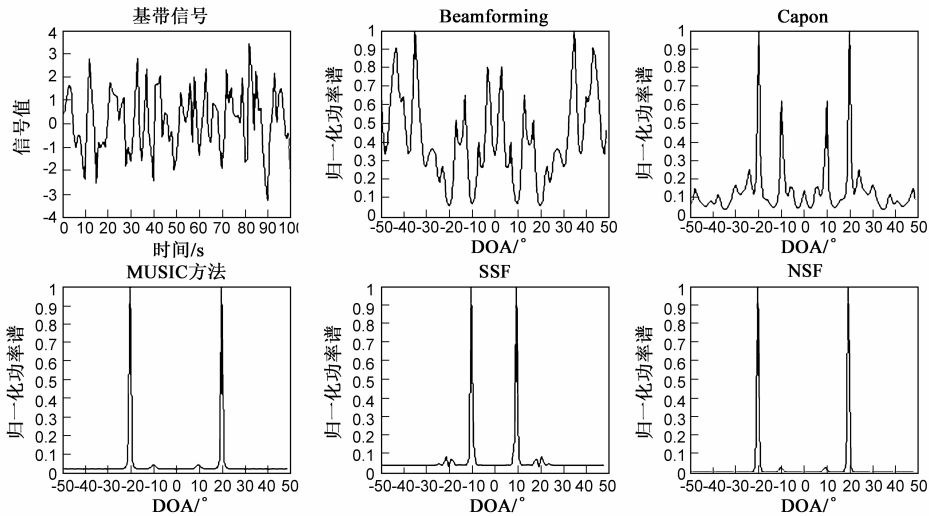


图2 高噪声背景下频谱分析方法的归一化功率谱图

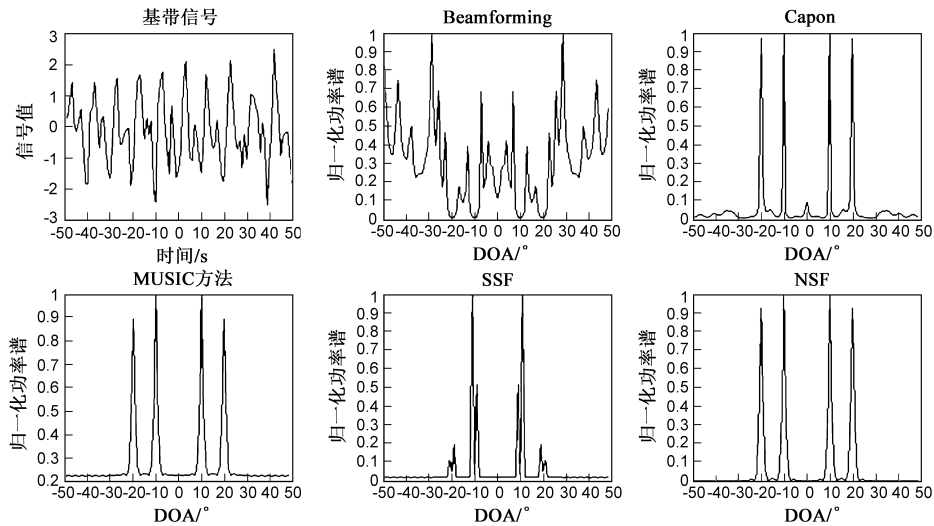


图3 低噪声背景下频谱分析方法的归一化功率谱图

## 4.2 BioSAR08 数据分析与评价

### 4.2.1 实验区与数据介绍

实验区位于瑞典北部 Västerbotten 省 Vindeln 自治市的林区(64°12'N, 19°46'E),该区绝大部分位于 Krycklan 流域. 林地类型为针阔混交林,主要的树种类型为欧洲赤松(*Pinus Silvestris*),挪威云杉(*Picea abies*),白桦(*Betula platyphylla* Suk)和白杨(*Populus alba*).海拔 160 - 320m,主要的土壤类型是冰碛母质土壤,介于海洋性与大陆性气候之间.由于特定的地理位置,该区已经成为森林水文学,生物地球化学循环,气候变化等研究的重点实验区.

实验数据为 E-SAR 在 Krycklan 流域开展 BioSAR 2008 计划时获取的 P-波段 SAR 数据,获取时间为 2008

年 10 月 14 日,水平基线间隔大约为 8m,最大水平基线约为 40m.斜距分辨率约为 2.1m,方位向分辨率约为 1.6m,平均入射角为 50°.研究所用数据是 P-波段全极化多基线 InSAR 数据,有 1 幅主影像 5 幅辅影像,即 6 基线数据.验证数据为 Lidar 获取的归一化 DSM 数据,最低为 0m,最高为 28.03m,是将 DSM 数据去除地形影响得到的表征地表目标高度的参数,在林区称作冠层高度模型(Canopy Height Model, CHM),由于多基线 TSAR 实验位于林区,后续章节均将此参数称为 CHM.

### 4.2.2 多基线 TSAR 构建

多基线 TSAR 构建的基本原理是通过增加垂直方向的合成孔径来提高分辨能力,其构建主要分为以下

几步:

(1) 选取主影像, 其他影像则为辅影像. 选取标准一般是主辅影像之间最大基线能够满足应用需求, 同时避免空间基线引起的失相干.

(2) 精配准. 将所有辅影像配准到主影像, 配准误差小于 0.1 个像元.

(3) 去平地相位. 按照数据获取几何结构(水平基线, 平台高度)等得到每对主辅影像平地相位信息, 并去掉每对影像中(主)辅影像的平地相位.

(4) 构建干涉复相干协方差矩阵. 应用去平后的主辅影像进行共轭相乘, 计算每对主辅影像的干涉复相干, 需要注意的是主影像本身计算的干涉复相干为 1.

(5) 计算导向矢量. 根据数据获取几何结构(平台高度, 空间基线, 入射角)等计算第  $n$  对主辅影像的有效波数  $k_z$ , 则导向矢量为:

$$\mathbf{a}(z) = [1, \exp(jk_z z), \dots, \exp(jk_z z)]^T \quad (13)$$

其中,  $k_z = \frac{4\pi B_n \cos(\theta - \alpha B)}{\lambda r_1 \sin\theta} = \frac{4\pi B_{\perp n}}{\lambda r_1 \sin\theta}$ ,  $B_{\perp n}$  为第  $n$  对主辅影像的垂直基线,  $r_1$  为主影像的斜距距离,  $\theta$  为主影像入射角.

#### 4.2.3 频谱技术分析

分别应用 Beamforming, Capon, MUSIC, NSF 与 SSF 五种方法对 4.2.2 构建的 6 基线干涉协方差矩阵进行频谱分析, 结果如图 4(b-f) 所示, 纵轴为高度(单位 m), 横轴为斜距. 图中白色曲线为 CHM, 蓝线为地表. 从图 4(b-f) 可以发现, Beamforming 难以提取森林内部及冠层信息, 不适合应用于林区, 尤其是树高相对较低的针阔混交林区. Capon 方法适合于提取森林垂直结构信息, 如森林内部散射体垂直分布等, 同时可以提取森林冠层信息, 如树高等. MUSIC 方法可用于提取林下地表信息与林下硬目标信息, HH 极化能够更好地表征林下地表信息, 同时, MUSIC 方法可以得到较弱的冠层剖面. SSF 方法能够较好地识别分布式散射体的位置, 能够在一定程度上提取冠层剖面但在高植被区冠层剖面提取效果较差. NSF 方法能够提取森林冠层信息, 如树高, 能够较好地识别高植被区下地表及近地表信息, 但对低矮植被区冠层、地表等识别较差. 同时, HV 极化方式更有利于提取森林垂直分布及冠层信息, HH 极化更适用于提取林下地表及近地表信息. 因此, 从该研究区可以发现, 对于 HV 极化, Capon 方法可以有效提取森林垂直分布信息及冠层高度; 对于 HH 极化, MUSIC 方法能够

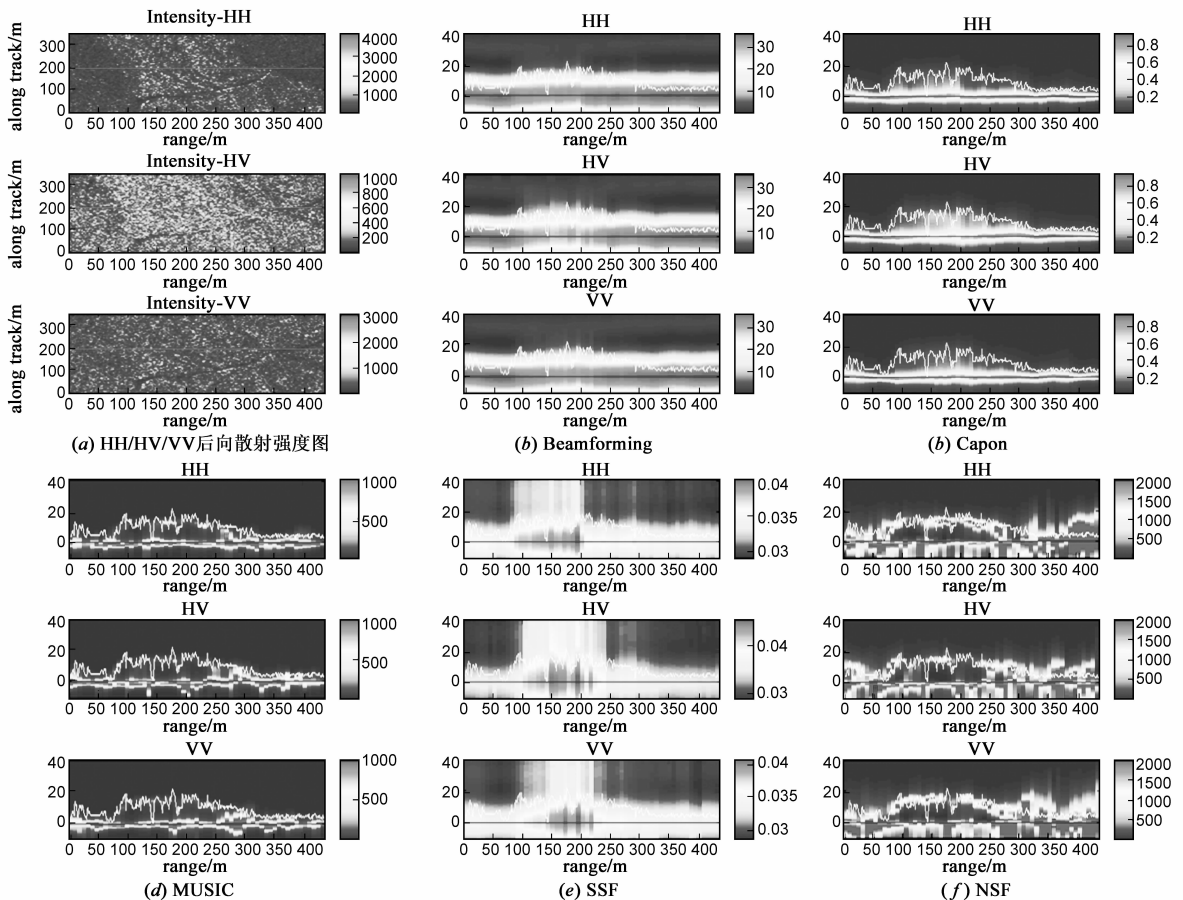


图4 HH/HV/VV极化后向散射强度及其对应频谱分析结果

提取林下地表信息(如 DEM),而 NSF 方法有利于提取林下硬目标或具有二次散射特性的目标。

## 5 总结

本文分别应用数值模拟分析与实测数据分析给出了针对林业不同应用需求的最佳频谱分析技术,尤其是对森林冠层高度提取,森林垂直结构信息提取及林下地表信息提取分别给出了适用的频谱分析方法,能够为今后应用 TSAR 在林区提取信息选择何种频谱分析技术提供参考。今后的研究工作将进一步集中于森林冠层高度提取,林下地形及近地表信息提取等方面,为森林生物量估测,进而为森林碳储量评估、森林固碳能力等研究服务。

**致谢** 感谢 ESA/DLR 为“中欧合作龙计划 Pol-InSAR 项目”提供的 BioSAR 2008 数据,感谢 Stefano Tebaldini 博士在层析 SAR 方面给予的帮助与支持。

## 参考文献

- [1] Tebaldini S, Rocca F. Multibaseline polarimetric SAR tomography of a boreal forest at P-and L-bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(1): 232 – 246.
- [2] F Gini, F Lombardini, M Montanari. Layover solution in multi-baseline SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1344 – 1356.
- [3] Stefan Sauer, et al. Multibaseline pol-insar analysis of urban scenes for 3D modeling and physical feature retrieval at l-band [A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Barcelona: IEEE, 2007. 1098 – 1101.
- [4] S Guillaso, et al. Evaluation of the esprit approach in polarimetric interferometric SAR [A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Seoul: IEEE, 2005. 1 – 4.
- [5] Huang Yue, Ferro-Famil Laurent, Reigber Andreas. Under-foilage object imaging using SAR tomography and polarimetric spectral estimators [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(6): 2213 – 2225.
- [6] S Sauer, L Ferro-Famil, et al. Physical parameter extraction over urban areas using l-band polsar data and interferometric baseline diversity [A]. Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Barcelona: IEEE, 2007. 5045 – 5048.
- [7] Tebaldini S, Rocca F. Single and multi-polarimetric SAR tomography of forested areas: a parametric approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2375 – 2387.
- [8] 王学猛, 王斌. 二维 Root-MUSIC 算法的快速实现方法 [J]. 声学技术, 2011, 30(6): 542 – 546.  
WANG Xue-meng, WANG Bin. Research on fast-realization of 2D Root-MUSIC algorithm [J]. Technical Acoustics, 2011, 30

- (6): 542 – 546. (in Chinese)
- [9] 王安义, 战金龙, 卢建军. 一种新的二维 Capon 算法的研究 [J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(4): 437 – 440.  
WANG An-yi, ZHAN Jin-long, LU Jian-jun. A new 2-D Capon algorithm [J]. Journal of Xi' an University of Science and Technology, 2003, 23(4): 437 – 440. (in Chinese)
- [10] Huang Yue. Tomographic processing of polarimetric and interferometric SAR data for urban and forestry remote sensing [D]. Rennes: University Rennes, 2011. 83 – 153.
- [11] A Reigber, A Moreira. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline l-band data [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2142 – 2152.
- [12] Reigber Andreas. Airborne polarimetric SAR tomography [D]. Stuttgart: Institute of Navigation University of Stuttgart, 2001. 53 – 70.
- [13] V Veen B D, K M Buckley. Beamforming: a versatile approach to spatial filtering [J]. IEEE ASSP Magazine, 1988, 5(2): 4 – 24.
- [14] J Homer, I Longstaff, Z She, D Gray. High resolution 3D imaging via multi-pass SAR [J]. IEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation, 2002, 149 (1): 45 – 50.
- [15] P Stoica, R Moses. Spectral Analysis of Signals [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 150 – 209, 275 – 334.
- [16] F Gini, F Lombardini. Multibaseline cross-track SAR interferometry: a signal processing perspective [J]. IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems, 2005, 38(4): 1344 – 1356.
- [17] M Viberg, B Ottersten. Sensor array processing based on subspace fitting [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1991, 39: 1110 – 1121.
- [18] P Stoica, A Nehorai. Performance study of conditional and unconditional direction-of arrival estimation [J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1990, 38(10): 1783 – 1795.

## 作者简介

**李文梅** 女, 1984 年 12 月生于山东聊城, 毕业于中国林业科学研究院获博士学位, 现为南京邮电大学讲师, 主要研究方向为层析合成孔径雷达, 森林垂直结构信息提取, 极化干涉 SAR。

E-mail: liwm@njupt.edu.cn

**陈尔学 (通信作者)** 男, 1968 年 8 月生于山东菏泽, 博士, 现为中国林业科学研究院研究员, 主要研究方向为合成孔径雷达, 极化 SAR, 林业遥感, 极化干涉 SAR。

E-mail: chenerx@caf.ac.cn

**李增元** 男, 1959 年 12 月生于内蒙古, 中国林业科学研究院博士生导师, 主要从事林业遥感及植被生态环境遥感技术研究, 目前重点研究方向为极化 SAR、极化干涉 SAR 遥感数据处理及森林结构信息反演模型和方法。

E-mail: lzy@caf.ac.cn