

## 一种基于最小二乘法的星载 ScanSAR 滚动角迭代估计算法

李 幸<sup>①②</sup> 洪 峻<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘 要:** 该文对于 ScanSAR 辐射定标中的滚动角估计问题进行了研究, 重点分析了波束间相对偏差对于滚动角估计算法的影响。在此基础上提出了一种改进算法, 该算法的估计模型中不仅考虑了波束间的相对增益偏差, 而且考虑了波束间的相对角度偏移。对估计模型进行线性化处理后, 可利用最小二乘法来迭代求解滚动角。通过仿真实验, 分析了该算法在不同信噪比情况下的估计精度, 并将其与 Dragosevic 的算法进行了比较, 证明了该算法的优良性能。

**关键词:** 扫描模式 SAR; 相对增益偏差; 相对角度偏移; 滚动角

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2099-04

## A ScanSAR Roll Angle Iterative Estimation Algorithm Based on Least Square Method

Li Xin<sup>①②</sup> Hong Jun<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** This paper works on a critical issue of roll angle estimation in ScanSAR radiometric calibration. After a deep analysis of the relative discrepancies between constituent beams, an improved algorithm is proposed, whose estimation model takes into account both the relative gain discrepancy and the relative beam angular placement between constituent beams. By linearizing the estimation model, an iterative solution of the roll angle can be achieved by means of least square method. Through simulation the estimation accuracy of the proposed algorithm is evaluated under different SNR levels and compared with Dragosevic's algorithm. The superiority of the proposed algorithm is proved with the results.

**Key words:** ScanSAR; Relative gain discrepancy; Relative beam angular placement; Roll angle

### 1 引言

扫描模式 SAR(ScanSAR)的宽测绘带能力是通过对各扫描波束形成的子带图像进行距离向拼接实现的, 由于距离向天线方向图的调制作用 ScanSAR 图像在距离向将产生辐射不均匀现象, 在 ScanSAR 图像辐射校正中需要对此进行精确的校正处理<sup>[1]</sup>。影响其校正精度的主要误差源是天线方向图的测量误差以及天线与图像之间的配准误差。在不考虑天线方向图本身误差的前提下(此误差由外定标技术指标决定), 其校正精度主要取决于天线和图像之间的配准精度。影响天线和图像配准的因素有很多, 但最主要的原因在于卫星的滚动角误差。在扫描模式下, 天线和图像之间的配准将涉及到若干个波束, 因此除了滚动角误差的影响外, 还须考虑波束间相对角度偏移的影响<sup>[2]</sup>。

将各波束天线方向图与子带图像之间的失配角度定义为波束滚动角, 影响各波束滚动角的因素主要有两个方面: 一是卫星滚动角, 这个因素对于各子波束的影响是相同的;

二是由波束中心电轴指向偏移造成的滚动角, 这个因素对于各子波束是不相同的<sup>[3]</sup>。另外, 考虑到各子波束的天线方向图通常是单独测量得到的, 由于不同定标试验中存在的卫星滚动角通常不相同, 使得各子波束的天线方向图测量结果之间会存在相对中心视角偏移<sup>[4]</sup>。这些因素都会导致波束间出现相对角度偏移, 使得各子波束对应的滚动角是不相同的, 因此, 对于 ScanSAR 滚动角的估计相对比较复杂。

在 ScanSAR 工作模式中, 波束边界区域正是相邻波束的重叠区, 即子带图像进行距离向拼接的地方, 在该区域天线增益变化较快, 如果存在滚动角误差, 将会导致明显的天线方向图校正误差。另外, 在该区域两个天线增益的变化方向相反, 使得对应的校正误差方向也相反, 导致相邻波束的过渡区很容易出现辐射不连续现象。在对子带图像进行拼接时, 若采用在天线等增益点处直接过渡的拼接方法, 则由于过渡点处存在增益跳变, 所得 ScanSAR 图像中将出现明显的波束边界条带现象<sup>[1]</sup>。因此, 对滚动角进行精确估计是 ScanSAR 辐射校正中的一个关键问题。

ScanSAR 波束重叠区的数据为滚动角的估计提供了便利, Luscombe<sup>[3]</sup>在 1993 年首先提出利用波束重叠区的数据来改进 ScanSAR 天线指向估计的思想, Bamler<sup>[5]</sup>发展了该思想, 针对 SIR-C 中的滚动角估计问题提出了一种算法, 通过比较图像等强度点与天线方向图等增益点之间的角度偏差来估计滚动角, 在估计图像等强度点时采用了线性拟合的方法来抑制噪声干扰。此后 Jin<sup>[6]</sup>又提出了比值法, 在估计图像等强度点时采用了卷积迭代的方法, 这两种算法都是建立在各子带之间的增益一致性的基础上的, 一旦由于某些原因, 如波束间相对定标误差, ADC(Analog-to-Digital Converter)饱和效应等, 导致子带之间出现相对增益偏差, 则算法精度将受到影响。出于这种考虑, Dragosevic<sup>[7]</sup>提出了一种算法, 在估计滚动角时特意考虑了波束间相对增益偏差的影响, 但该算法是建立在各波束对应相等的滚动角这个前提上的。根据前面的分析, 各波束对应的滚动角在实际中是存在偏差的, 因此, 本文提出了一种改进算法, 用于对各子波束的滚动角分别进行估计, 该算法不仅考虑了波束间的相对增益偏差, 而且考虑了波束间的相对角度偏移, 使得算法在实际应用中具有良好的性能。

## 2 滚动角估计原理及 Dragosevic 的算法简介

目前的 ScanSAR 滚动角估计算法大都是利用波束重叠区的数据来进行估计的。在波束重叠区, 影响图像功率的因素除了天线方向图之外, 其它都是一样的, 如与目标相关的因素, 或者是可进行归一化校正的, 如接收机增益等。假定除了距离向天线方向图校正以外, 对子带图像进行了适当的归一化处理, 则同一目标在两子带图像中对应的功率之差, 理论上将与相应的天线增益之差相一致, 通过比较两者之间的实际偏差, 可获得滚动角误差的信息。

考虑子带  $i$  的图像, 假定除了距离向天线方向图校正以外, 利用内定标数据等对其进行了适当的归一化处理。对图像功率取对数以 dB 为单位, 在若干个 Burst 范围内将图像功率沿方位向进行平均, 并根据星地几何关系将斜距转化为距离向视角, 得到图像功率随距离向视角变化的曲线, 记为  $S_i(\theta)$ , 则可建立式(1)所示常用模型<sup>[5]</sup>:

$$S_i^{\text{dB}}(\theta) = G_{i,S}^{\text{dB}} + W_i^{\text{dB}}(\theta + \phi_{\text{roll}}) + I_i^{\text{dB}}(\theta) + N^{\text{dB}} \quad (1)$$

式中  $G_S^{\text{dB}}$  表示归一化后的系统增益, 其中包括了发射功率、接收机增益、成像处理器增益等各种因素;  $W^{\text{dB}}$  代表双程距离向天线方向图函数;  $I^{\text{dB}}$  代表与目标相关的各因素, 包括目标的向后散射特性  $\sigma$ , 目标所在位置对应的入射角, 以及斜距损耗因子  $R^{-3}$ , 这三方面的因素;  $N^{\text{dB}}$  代表光斑噪声, 由于取对数运算使其由乘性噪声转化为了加性噪声。

对于子带  $i+1$ , 采用同样的方法计算其图像功率随距离向视角变化的曲线  $S_{i+1}^{\text{dB}}(\theta)$ 。提取子带  $i$  和  $i+1$  的重叠区, 对应视角范围记为  $\theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$ , 将同一视角对应的两平均功率相减, 移除与目标相关的因素, 所得功率差值为

$$S_i^{\text{dB}}(\theta) - S_{i+1}^{\text{dB}}(\theta) = [G_{i,S}^{\text{dB}} - G_{i+1,S}^{\text{dB}}] + [W_i^{\text{dB}}(\theta + \phi_i) - W_{i+1}^{\text{dB}}(\theta + \phi_{i+1})] + n \quad (2)$$

式中  $n$  表示合并后的噪声项, 该功率差值中包含了滚动角的信息。如果假定对各子带图像进行了理想的归一化处理, 则  $G_{i,S}^{\text{dB}}$  和  $G_{i+1,S}^{\text{dB}}$  之间应该是相互一致的。然而在实际中, 由于波束间相对定标误差导致的天线峰值增益偏差<sup>[2]</sup>, 发射功率变化或接收机增益偏差, 以及 ADC 饱和效应<sup>[7]</sup>等, 这些因素都会影响波束间的辐射一致性。为此 Dragosevic 的算法引入了一个常量参数  $h$  来近似刻画波束间的相对增益偏差, 同时假定各子波束对应相同的滚动角, 将  $\phi_i$  和  $\phi_{i+1}$  合并为一个参数  $\phi$ , 则得到 Dragosevic<sup>[7]</sup>的算法估计模型如下:

$$\mathbf{S}_i^{\text{far}} - \mathbf{S}_{i+1}^{\text{near}} = \mathbf{W}_i^{\text{far}}(\phi) - \mathbf{W}_{i+1}^{\text{near}}(\phi) + h \cdot \mathbf{1}_{n_i} + N \quad (3)$$

其中  $n_i$  表示重叠区内所包含的距离单元数目,  $\mathbf{1}_{n_i}$  表示  $n_i$  维的全 1 列向量, 其余大写字母都代表  $n_i$  维列向量。综合考虑所有相邻子带的重叠区, 根据式(3)建立关于  $\phi$  的超定方程组。对其进行线性化近似处理, Dragosevic 的算法给出如下迭代求解模型:

$$\hat{\Delta}\phi^{(k+1)} = \frac{\sum_{i=1}^b \Delta D_i(\hat{\phi}^{(k)})^T \cdot (\Delta S_i - \Delta W_i(\hat{\phi}^{(k)}))}{\sum_{i=1}^b \Delta D_i(\hat{\phi}^{(k)})^T \cdot \Delta D_i(\hat{\phi}^{(k)})} \quad (4)$$

$$\hat{h}_i^{(k+1)} \mathbf{1}_{n_i} = \bar{S}_i - \bar{D}_i(\hat{\phi}^{(k)}) \cdot \hat{\Delta}\phi^{(k+1)} \quad (5)$$

其中  $D_i$  表示天线方向图的导数, 上划线表示取均值运算, 符号  $\Delta$  代表如下运算, 即每个向量减去其均值后所得新向量, 如  $\Delta S_i = (\mathbf{S}_i^{\text{far}} - \mathbf{S}_{i+1}^{\text{near}}) - \overline{(\mathbf{S}_i^{\text{far}} - \mathbf{S}_{i+1}^{\text{near}})}$ 。当波束重叠区对应的天线方向图为线性函数时, 其导数  $D_i$  将成为常数, 而  $\Delta D_i$  将成为零值, 上述算法将不能再实施。

根据以上介绍, Dragosevic 的算法是从方程求解的角度来估计滚动角, 其求解过程相对比较复杂。另外, 由于该算法假定各波束对应相同的滚动角, 因此, 算法精度很容易受波束间相对视角偏差的影响而下降。

## 3 改进的算法

目前对于 ScanSAR 滚动角估计算法的研究<sup>[5-7]</sup>, 大都是利用波束重叠区的数据来进行估计, 这样可以移除目标散射特性的影响, 因此为滚动角估计提供了便利。但是算法估计的基础是波束间的一致性, 即假定各波束的滚动角是一样的, 多数算法还假定波束间的辐射增益是一致的, 一旦波束间存在相对偏差, 算法的估计精度将受到影响。根据这些分析, 对算法进行改进如下。

考虑子带  $i$  和  $i+1$  的重叠区, 其功率差值如式(2)所示。对于子带间的系统增益之差, 仍然引入一个未知常量  $h$  来近似刻画, 而对于两波束的滚动角, 将不再假定它们是相同的, 而是分别进行估计, 由此得到如下估计模型:

$$S_i^{\text{dB}}(\theta) - S_{i+1}^{\text{dB}}(\theta) = W_i^{\text{dB}}(\theta + \phi_i) - W_{i+1}^{\text{dB}}(\theta + \phi_{i+1}) + h + n, \quad \theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}] \quad (6)$$

该模型关于  $\phi_i$  和  $\phi_{i+1}$  都是非线性的。考虑到在实际中滚

动角的大小通常只有  $0.1^\circ$  左右<sup>[1]</sup>, 可利用如下近似关系来进行线性化处理:

$$W_i^{\text{dB}}(\theta + \phi_i) \approx W_i^{\text{dB}}(\theta) + D_i^{\text{dB}}(\theta)\phi_i \quad (7)$$

其中  $D_i^{\text{dB}}(\theta) = \frac{dW_i^{\text{dB}}(\theta)}{d\theta}$ , 表示距离向天线方向图的导数。对于波束  $i+1$  也进行线性近似处理, 则式(6)可以转化为如下线性模型:

$$\begin{aligned} S_i^{\text{dB}}(\theta) - S_{i+1}^{\text{dB}}(\theta) \approx & W_i^{\text{dB}}(\theta) + D_i^{\text{dB}}(\theta)\phi_i - W_{i+1}^{\text{dB}}(\theta) \\ & - D_{i+1}^{\text{dB}}(\theta)\phi_{i+1} + h + n \end{aligned} \quad (8)$$

对于式(8)所示线性观测模型, 利用若干观测样本, 通过最小二乘法即可得到关于滚动角的估计。考虑到式(7)所示线性近似的误差通常比较大, 为了提高其精度, 可以采用迭代计算的策略。记第  $k$  次估计结果为  $\hat{\phi}_i^{(k)}$ , 记  $\hat{\phi}_i^{(k)}$  与实际值  $\phi_i$  之间的差距为  $\Delta\phi_i^{(k+1)}$ , 则式(7)可以转化如下:

$$W_i^{\text{dB}}(\theta + \phi_i) \approx W_i^{\text{dB}}(\theta + \hat{\phi}_i^{(k)}) + D_i^{\text{dB}}(\theta + \hat{\phi}_i^{(k)})\Delta\phi_i^{(k+1)} \quad (9)$$

采用同样的方法对波束  $i+1$  进行线性化处理。假定重叠区  $[\theta_i, \theta_{i+1}]$  内包含  $M$  个距离单元, 相应距离向视角记为  $\Omega = [\theta^1, \theta^2, \dots, \theta^M]^T$ , 则式(6)可以转化为如下迭代估计模型:

$$\mathbf{Y}^{(k)} = \mathbf{H}^{(k)}[\Delta\phi_i^{(k+1)}, \Delta\phi_{i+1}^{(k+1)}, h^{(k+1)}]^T + \mathbf{N} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}^{(k)} = & [S_i^{\text{dB}}(\Omega) - S_{i+1}^{\text{dB}}(\Omega) - W_i^{\text{dB}}(\Omega + \hat{\phi}_i^{(k)}) \\ & + W_{i+1}^{\text{dB}}(\Omega + \hat{\phi}_{i+1}^{(k)})]_{M \times 1} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mathbf{H}^{(k)} = [D_i^{\text{dB}}(\Omega + \hat{\phi}_i^{(k)}) - D_{i+1}^{\text{dB}}(\Omega + \hat{\phi}_{i+1}^{(k)}) \quad \mathbf{1}_{M \times 1}]_{M \times 3} \quad (12)$$

其中  $\mathbf{1}_{M \times 1}$  表示  $M$  维的全 1 列向量。式(10)所示估计模型为线性观测方程, 可以利用最小二乘法来估计滚动角及波束间相对增益偏差。当  $\mathbf{H}^{(k)T}\mathbf{H}^{(k)}$  是非奇异矩阵时, 可得如下迭代估计结果:

$$\begin{bmatrix} \Delta\hat{\phi}_i^{(k+1)} & \Delta\hat{\phi}_{i+1}^{(k+1)} & h^{(k+1)} \end{bmatrix}_{LS}^T = [\mathbf{H}^{(k)T}\mathbf{H}^{(k)}]^{-1}\mathbf{H}^{(k)T}\mathbf{Y}^{(k)} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_i^{(k+1)} \\ \hat{\phi}_{i+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_i^{(k)} \\ \hat{\phi}_{i+1}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\hat{\phi}_i^{(k+1)} \\ \Delta\hat{\phi}_{i+1}^{(k+1)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

从一对初始值开始计算, 如  $\hat{\phi}_i^{(0)} = 0$ ,  $\hat{\phi}_{i+1}^{(0)} = 0$ , 经过若干次迭代后算法即可收敛。具体算法实施流程如图 1 所示。利用蒙特卡罗模拟方法, 可以验证经过取对数及沿方位向平均处理以后, 图像功率模型中的噪声满足独立同分布, 都服从高斯分布<sup>[6]</sup>。在此条件下, 可以证明最小二乘估计与最小

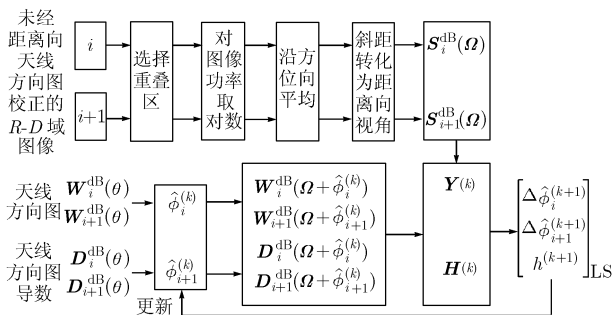


图 1 基于最小二乘法的 ScanSAR 滚动角迭代估计算法流程图

均方误差估计是等效的, 因此本文算法与 Dragosevic 的算法相比, 两者的估计方法是等效的, 但本文算法的估计模型中不仅考虑了波束间的相对增益偏差, 还考虑了相对角度偏移, 使其在实际中具有优良的性能, 这点将在后面的仿真实验中进行验证。

当  $\mathbf{H}^{(k)T}\mathbf{H}^{(k)}$  是奇异矩阵时, 表明重叠区域对应的天线方向图函数是线性的, 在这种情况下, 可以通过寻找功率差值的零交点, 即图像等功率点, 将其与已知天线方向图的等增益点相比较, 两者之间的偏差即反映了滚动角大小。在寻找图像等功率点时, 可以采用线性拟合的方法来抑制噪声, 具体分析可参考文献[5]。

#### 4 仿真试验及算法性能比较

为了检验改进算法的性能, 将其与 Dragosevic 的算法进行比较, 设计如下仿真实验: 扫描模式由 4 个条带组成, 每个条带所采用的距离向天线方向图如图 2 所示:

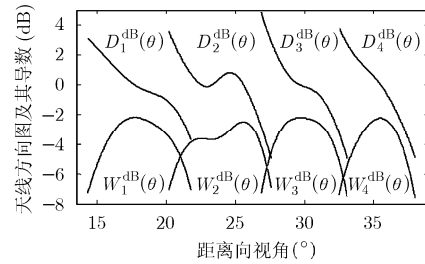


图 2 仿真中所用天线方向图及其导数

考察波束重叠区的天线方向图, 都是非线性的, 满足算法实施条件。其余仿真参数如表 1 所示, 方位向天线方向图采用 sinc 函数形式。对于目标的后向散射系数, 利用实际的 SAR 图像作为模板, 其图像灰度级范围是 0~255, 除以最大值进行归一化处理, 得到后向散射系数的范围大约为  $-24\text{dB} \sim 0\text{dB}$ 。

表 1 仿真参数

条带长度	3 个 Burst	Burst 长度	200 个脉冲
信号带宽	30MHz	卫星高度	625km
采样率	33MHz	卫星速度	7500m/s
信号时宽	30 $\mu\text{s}$	波长	0.24m
方位向波束宽度	0.7°	PRF	1400Hz

仿真实验流程如图 3 所示, 根据上述仿真参数, 利用时域相干法<sup>[8]</sup>来仿真各个子带的原始回波数据。考察仿真得到的回波数据, 其同相分量和正交分量的直方图近似为正常分布, 而幅度直方图则近似为瑞利分布, 与实际回波数据的统计特性完全一致。对于原始回波数据, 在其同相分量和正交分量上, 分别乘以一个高斯噪声, 以此来仿真光斑噪声的影

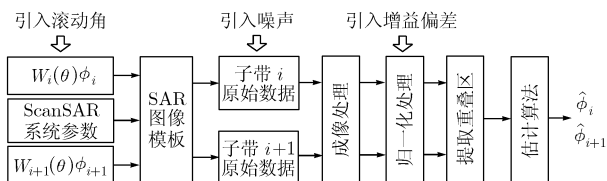


图3 仿真实验流程图

响<sup>[4]</sup>, 再对其附加一定功率的接收机加性噪声, 使回波数据达到一定的信噪比水平。

在仿真实验中, 对于每个波束的天线方向图, 分别引入一定的滚动角误差, 误差范围为  $-0.2^\circ \sim 0.2^\circ$ , 另外引入一定的波束间相对增益偏差, 偏差范围为  $-0.5\text{dB} \sim 0.5\text{dB}$ 。利用 Dragosevic 的算法和本文算法分别来进行估计, 比较所得滚动角估计值和预先设定值之间的偏差, 即为算法的估计误差。为了客观地评价算法, 利用多幅不同的 SAR 图像分别进行实验, 将每次的实验结果进行平均, 所得均值即为算法的估计精度。

当不引入波束间相对角度偏移, 即对各波束引入相同的滚动角时, 将本文算法和 Dragosevic 的算法进行比较, 如图 4 所示, 其中曲线表示 3 次多项式拟合结果。可见两种算法的精度随信噪比变化的关系稍有不同, 在低信噪比情况下, 本文提出的算法估计精度较高。当信噪比逐渐变好时, 两算法的精度之间的差别将随之变小, 基本在  $0.01^\circ$  范围以内。如果对各波束引入不同的滚动角, 则两种算法的估计精度将出现较大差别。当引入  $0.03^\circ$  波束间相对角度偏移时, 两种算法的估计精度如图 5 所示, 其中曲线表示 3 次多项式拟合结果。可以发现 Dragosevic 的算法的估计精度明显下降了, 即使在信噪比较高的情况下, 其估计精度也只有  $0.1^\circ$  左右, 而本文算法的估计精度则基本没变化。当引入更大的波束间相对角度偏移时, Dragosevic 的算法的估计精度将继续下降, 而本文算法基本不受影响, 从而证明了其良好的性能。

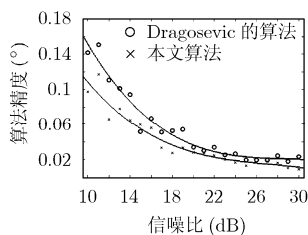
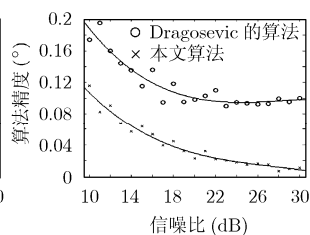


图4 无波束间相对角度偏移时算法的估计精度

图5 引入  $0.03^\circ$  波束间相对角度偏移时算法的估计精度

## 5 结束语

ScanSAR 距离向天线方向图校正需要涉及到若干个子带图像与天线的配准, 由于波束间相对角度偏移的影响, 使得各子波束对应的滚动角是不相同的, 因此本文提出了对各子波束的滚动角分别进行估计的改进算法。通过仿真实验, 分析了在不同信噪比情况下, 该算法与 Dragosevic 的算法各自的估计精度, 结果表明当不存在波束间相对角度偏移时, 两种算法的估计精度相差不大, 当存在波束间相对角度偏移时, Dragosevic 的算法的估计精度将明显下降, 而本文提出的算法则基本不受影响, 从而证明了其优良的性能。

## 参考文献

- [1] Cumming I G and Bast D C. A new hybrid-beam data collection strategy to support ScanSAR radiometric calibration [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(1): 3-13.
- [2] Hawkins R K, Wolfe J, Murnaghan K, and Jefferies W C. Exploring the elevation beam overlap region in RADARSAT-1 ScanSAR [C]. Proc. CEOS WGCV-SAR Workshop, Tokyo, Japan, Apr.2-5, 2001, NASDA/ESA.
- [3] Luscombe A P. Using the overlap regions to improve ScanSAR calibration. Proc. CEOS SAR Calibration Workshop, Noordwijk, The Netherlands, 1993, 9: 118-123.
- [4] Zink M and Rosich B. Antenna elevation pattern estimation from rain forest acquisitions. Proceedings, Envisat Calibration Review, ESTEC, 2002, 9: 9-13.
- [5] Bamler R. Roll angle estimation in SIR-C ScanSAR processing. Jet Propulsion Lab., Pasadena, CA, JPL Interoffice Memo 3340-94-030, 1994.
- [6] Jin M. Optimal range and doppler centroid estimation for a ScanSAR system [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 479-488.
- [7] Dragosevic M V. Roll angle measurement and compensation strategy for RADARSAT ScanSAR. Proc. CEOS SAR Workshop, Toulouse, France, 1999, 10: 26-29.
- [8] Franceschetti G and Migliaccio M. SARAS: A Synthetic Aperture Radar (SAR) raw signal simulator [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110-123.

李 幸: 女, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为信号与信息处理。

洪 峻: 男, 1960 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究 SAR 图像处理、定标及应用技术。