

分布式小卫星合成孔径雷达三维地形成像的最优垂直轨迹基线

徐华平 周荫清 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘要 分布式小卫星合成孔径雷达 (DSS-SAR)中垂直轨迹基线和沿轨迹基线同时存在、相互耦合, 且具备多个基线, 因此与单星 SAR 干涉相比, DSS-SAR 三维地形成像最优垂直轨迹基线的确定更为复杂。该文提出了一种确定 DSS-SAR 三维地形成像最优垂直轨迹基线的新方法。该方法根据 DSS-SAR 干涉复图像对的相位差的统计特性, 推导了 DSS-SAR 多基线干涉的干涉相位的克拉美-罗界, 并由此求得测高误差与垂直轨迹基线之间的关系式, 令测高误差对垂直轨迹基线的导数为零, 得出 DSS-SAR 三维地形成像的最优垂直轨迹基线。最后根据最优垂直轨迹基线的计算式, 详细分析并推导了由 3 颗小卫星构成的不同空间编队构形 DSS-SAR 的最优垂直轨迹基线, 结果表明, 当基线数为 1 时, 论文推导的 DSS-SAR 多基线干涉最优垂直轨迹基线与已有单星 SAR 干涉最优基线设计结果一致。此分析结果验证了论文方法的正确性。

关键词 分布式小卫星, SAR, 最优基线, 编队构形

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)02-0340-05

The Optimal Across-Track Baseline of Distributed Small Satellites Synthetic Aperture Radar for Terrain Elevation Measurement

Xu Hua-ping Zhou Yin-qing Li Chun-sheng

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract In distributed small satellites-synthetic aperture radar (DSS-SAR), the correlation of echoes is determined by both across-track and along-track baselines which are coupling, and the multi-baseline interferometry is obtained with multi small satellites SAR images. The optimal across-track baseline of DSS-SAR for terrain elevation measurement is more complicatedly determined than that of conventional SAR interferometry. A novel approach is presented in this paper to determine the optimal across-track baseline of DSS-SAR multi-baseline interferometry. On the basis of the statistical characteristics of phase difference of complex SAR image pair, the DSS-SAR interferometric phase estimation Crammer-Rao bound is deduced. The relationship between terrain height accuracy and across-track baseline is presented from the bound. And then the optimal across-track baseline is derived via derivative calculation. Finally, the optimal across-track baseline in different DSS-SAR configuration with three small satellites is calculated and analyzed. It is showed that the optimal baseline of single across-track baseline interferometry according to this paper is in agreement with that from known single satellite SAR interferometry. The result validates the novel approach proposed by this paper.

Key words Distributed small satellites, SAR, Optimal baseline, Configuration

1 引言

分布式小卫星合成孔径雷达(Distributed Small Satellite-Synthetic Aperture Radar, DSS-SAR)是以 SAR 为有效载荷, 以编队飞行小卫星群为平台的空对地观测系统。它利用空间编队飞行的多颗小卫星形成多个基线实现干涉 SAR 三维地形测高, 可以在全球范围内获得性能稳定的高精度数字高

度图^[1]。基线是DSS-SAR中的重要参数, 它是指小卫星之间的相对位置关系。垂直轨迹基线是基线在垂直于卫星飞行轨迹的平面上, 并且垂直于视线方向的分量; 而基线在沿轨迹方向的分量则称为沿轨迹基线。在DSS-SAR中, 垂直轨迹基线与沿轨迹基线同时存在, 而且两者之间还存在着一定的耦合关系。

垂直轨迹基线决定了 SAR 干涉的测高精度。随着垂直

轨迹基线的增大, 干涉图像的相关性降低, 干涉相位的估计误差增大, 但干涉相位估计误差对地形高度误差的影响却减小, 因此存在一个最优垂直轨迹基线使得 SAR 干涉的测高误差最小。与单星 SAR 干涉中仅存在一个垂直轨迹基线不同, DSS-SAR 回波信号的干涉性能同时受到垂直轨迹基线和沿轨迹基线的影响, 这两种基线之间存在着一定的耦合关系, 而且多颗小卫星形成了多个垂直轨迹基线干涉, 因此与单星 SAR 干涉相比, DSS-SAR 干涉中最优垂直轨迹基线的确定比较复杂。

文献[2,3]主要讨论单星 SAR 干涉的最优垂直轨迹基线问题, 关于 DSS-SAR 三维地形成像的最优垂直轨迹基线的分析还很少, 尤其是其最优垂直轨迹基线的计算公式在公开发表的文献中尚未见到。本文主要讨论 DSS-SAR 实现三维测高的最优垂直轨迹基线。第 2 节提出 DSS-SAR 三维地形成像的最优垂直轨迹基线的确定方法; 第 3 节给出了 DSS-SAR 干涉复图像对相位差的概率密度分布函数; 第 4 节推导了采用最大似然法估计干涉相位的克拉美-罗界(C-R); 第 5 节推导了 DSS-SAR 多基线干涉最优垂直轨迹基线的计算式; 第 6 节利用本文提出的最优垂直轨迹基线的确定方法, 分析了 3 颗小卫星构成的不同空间编队构形 DSS-SAR 干涉的最优垂直轨迹基线。

2 DSS-SAR 三维地形测高最优垂直轨迹基线确定方法

最优垂直轨迹基线为使得测高误差最小的垂直轨迹基线。要得到最优垂直轨迹基线的确定公式, 首先需要给出测高误差与垂直轨迹基线之间的定量关系式, 然后通过计算测高误差对垂直轨迹基线的导数, 并令导数为零, 就可以求得最优垂直轨迹基线。可以看出, 求取最优垂直轨迹基线的关键是确定测高误差与垂直轨迹基线之间的定量关系。文献[4]分析了影响测高的因素, 指出基线估计误差与干涉相位估计误差是影响测高精度的主要因素。通过设置地面标志点可以大大降低基线估计误差对测高精度的影响[4], 因此本文主要考虑干涉相位估计误差所引起的高度测量误差。

针对 DSS-SAR 三维地形测高的特点, 本文提出了一种最优垂直轨迹基线的确定方法, 其具体实现如图 1 所示。首先从 DSS-SAR 干涉复图像对的相位差的统计特性出发, 通过计算干涉相位最大似然估计的克拉美-罗界(C-R), 得到干涉相位估计误差与垂直轨迹基线之间的定量关系式; 然后利用误差传递公式得到高度估计误差与垂直轨迹基线之间的定量关系式; 最后高度估计误差对垂直轨迹基线求导, 并令导数为零, 即可得到最优垂直轨迹基线的确定公式。

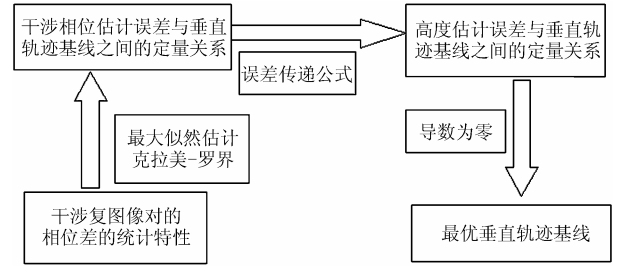


图 1 最优垂直轨迹基线的确定方法

3 干涉复图像对的相位差的统计特性

DSS-SAR 中干涉复图像对的相位差是随机的, 它的统计特性与 SAR 回波的随机特性有关。假设均匀地面散射场景是均值为零的复数高斯随机过程, 根据高斯过程经过线性系统仍为高斯过程的性质, 可以认为 SAR 单视复图像是均值为零的复高斯随机过程。基于此可以得到, DSS-SAR 中任意两颗小卫星 Sat_m 和 Sat_n 获得的 SAR 单视复图像 s_m 和 s_n 之间的相位差 ϕ 的概率密度函数为[5]

$$p(\phi) = \frac{1 - |\gamma_{m,n}|^2}{2\pi} \frac{|\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n})}{1 - |\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n})} \cdot \left(1 + \frac{|\gamma_{m,n}| \cos(\phi - \phi_{m,n}) \arccos[1/2 - |\gamma_{m,n}| \cos(\phi - \phi_{m,n})/2]}{\sqrt{1 - |\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n})}} \right) \quad (1)$$

其中 $\gamma_{m,n}$ 为 s_m 和 s_n 的复相关系数, $\phi_{m,n} = \arg(\gamma_{m,n}) = \text{mod}\left(-\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m,n), 2\pi\right)$ [6], $\arg(\cdot)$ 表示取括号内复数的幅角, $\text{mod}(\cdot, 2\pi)$ 表示括号中第一个数对 2π 取模, $\Delta r(m,n)$ 为 Sat_m 和 Sat_n 之间的斜距差, n_{factor} 为收发因子, 对于收发分置系统 n_{factor} 取 1, 收发同置系统 n_{factor} 取 2。

另外, 三维地形成像处理中常采用多视处理抑制干涉图像噪声, Lee 等人推导了多视情况下干涉复图像对的相位差的概率密度函数为[7]

$$p^{(N_{\text{look}})}(\phi) = \frac{\Gamma(N_{\text{look}} + 1/2) (1 - |\gamma_{m,n}|^2)^{N_{\text{look}}}}{2\sqrt{\pi} \Gamma(N_{\text{look}}) [1 - |\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n})]^{N_{\text{look}} + 1/2}} \cdot |\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n}) + \frac{(1 - |\gamma_{m,n}|^2)^{N_{\text{look}}}}{2\pi} \cdot F(N_{\text{look}}, 1; 1/2; |\gamma_{m,n}|^2 \cos^2(\phi - \phi_{m,n})) \quad (2)$$

式中, N_{look} 为多视处理的视数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Γ -函数, $F(\cdot; \cdot; \cdot)$ 为高斯超几何函数。令 $N_{\text{look}} = 1$, 式(2)就可以化简为式(1)。

观察式(1)和式(2)知道, 干涉复图像对的相位差的概率密度分布函数是以 2π 为周期的周期性函数。在一个周期 $[\phi_{m,n} - \pi, \phi_{m,n} + \pi)$ 内, 概率密度函数在 $\phi_{m,n}$ 处具有最大值, 且关于该最大值对称。根据均值的计算公式, 求得随机变量 ϕ 在 $[\phi_{m,n} - \pi, \phi_{m,n} + \pi)$ 内的均值为

$$E\{\phi\} = \phi_{m,n} = \text{mod}\left(-\frac{2\pi n_{\text{factor}}}{\lambda} \Delta r(m,n), 2\pi\right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出,干涉复图像对的相位差的均值为用于计算地形高度的干涉相位对 2π 的模值。三维地形成像取干涉相位的过程,实际上就是估计干涉复图像对的相位差均值 $\phi_{m,n}$ 的过程。因此,干涉相位的估计精度就可以通过计算 $\phi_{m,n}$ 的估计精度来得到。

4 干涉相位的估计精度

DSS-SAR 三维地形成像可以利用多颗小卫星获取的多幅 SAR 复图像估计干涉相位。由于垂直轨迹基线越长,干涉相位误差引起的测高误差越小,因此在多基线干涉中常利用最长的垂直轨迹基线 B_n 对应的干涉复图像对的相位差均值 ϕ_0 来计算地形高度。对于 K 颗小卫星构成的分布式系统,有 $\phi_0 = \max\{\phi_{m,n}, m, n=1, \dots, K\}$ 。

K 颗小卫星构成的DSS-SAR中,采用最大似然法估计干涉相位 ϕ_0 , 构造 N_{look} 视处理后的似然函数为^[8]

$$\begin{aligned} f_{\text{ML}}(\phi_0) &= \sum_{i=1}^{N_{\text{look}}} \ln p(s_1^i, s_2^i, \dots, s_K^i | \phi_0) \\ &= -\sum_{i=1}^{N_{\text{look}}} \ln[\pi^K \det(\Theta^i)] - \sum_{i=1}^{N_{\text{look}}} (\mathbf{S}^i)^H (\Theta^i)^{-1} \mathbf{S}^i \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{S}^i = [s_1^i, s_2^i, \dots, s_K^i]^T$, s_k^i 为第 k 颗小卫星获得的第 i 复图像, $k=1, \dots, K$, $i=1, \dots, N_{\text{look}}$ 。 Θ^i 为 \mathbf{S}^i 的协方差阵。 ϕ_0 的最大似然估计值 $\hat{\phi}_0$ 满足下列关系式:

$$\left. \frac{\partial f_{\text{ML}}(\phi_0)}{\partial \phi_0} \right|_{\phi_0=\hat{\phi}_0} = 0 \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),很容易可以证明 $\hat{\phi}_0$ 是 ϕ_0 的无偏估计。根据估计理论^[9],任一无偏估计的方差最小可达C-R界。根据C-R界的计算公式,可以求得 ϕ_0 的最小估计方差为

$$\sigma_{\phi_0}^2 = \frac{1}{2N_{\text{look}}[\text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{\Gamma}) - \text{tr}(\mathbf{A}^2)]} \quad (6)$$

式中

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{\Gamma} &= P_n(\text{SNR}+1) \begin{bmatrix} |\gamma_{1,1}| & |\gamma_{1,2}| & \dots & |\gamma_{1,K}| \\ |\gamma_{2,1}| & |\gamma_{2,2}| & \dots & |\gamma_{2,K}| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |\gamma_{K,1}| & |\gamma_{K,2}| & \dots & |\gamma_{K,K}| \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\alpha_k = B_n(1,k)/B_n$, $B_n(1,k)$ 为第1颗小卫星与第 k 颗小卫星之间的垂直轨迹基线, $k=2, \dots, K-1$, 这里假设了第1颗小卫星与第 K 颗小卫星之间的垂直轨迹基线最长。SNR 为

SAR 图像的信噪比, P_n 为系统热噪声数。

5 DSS-SAR 多基线干涉的最优垂直轨迹基线

不考虑数据处理带来的误差,认为非模糊干涉相位 ψ 与 ϕ_0 的估计精度相同,均达到C-R界。将式(6)代入SAR干涉测高精度公式^[4],则得到地形测高误差为

$$\sigma_h^2 = \left(\frac{r\lambda \sin\theta}{2\pi n_{\text{factor}} B_n} \right)^2 \frac{1}{2N_{\text{look}}[\text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{\Gamma}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{\Gamma}) - \text{tr}(\mathbf{A}^2)]} \quad (8)$$

其中 r 为斜距, λ 为波长, θ 为雷达视角。下面就通过式(8)对垂直轨迹基线求导,令导数为零,推导使得式(8)给出的地形测高误差达到最小值时的最优垂直轨迹基线。

DSS-SAR 采用多基线干涉实现三维地形成像。从理论上讲, K 幅 SAR 图像干涉,具有 $K-1$ 个独立的最优垂直轨迹基线参数 $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{K-1}$ 和 B_n 。分别对 σ_h^2 求 $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{K-1}$ 和 B_n 的导数,并令导数为0,可以得到如下所示的 $K-1$ 元方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\sigma_h^2)}{\partial \alpha_2} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial(\sigma_h^2)}{\partial B_n} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

解式(9)给出的方程组,就可以得到使测高精度最好的 $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_{K-1}$ 和 B_n 的最优值,即最优垂直轨迹基线。

式(9)中存在矩阵求逆运算,而且DSS-SAR中垂直轨迹基线和沿轨迹基线之间存在着一定的耦合关系,因此直接给出最优基线的显式解是非常困难的。本文在下面详细讨论3颗小卫星组成的DSS-SAR系统进行干涉时的最优垂直轨迹基线 B_{nopt} 。

6 3颗小卫星构成的DSS-SAR三维地形测高的最优垂直轨迹基线

3颗小卫星组成的DSS-SAR系统可以在全球范围内进行性能稳定的单基线干涉三维地形成像。3颗小卫星组成的DSS-SAR系统有

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = P_n(\text{SNR}+1) \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 $\rho = \rho_{\text{noise}} \rho_{\text{aspatial}} \rho_{\text{rspatial}}$, $\rho_{\text{noise}} = \frac{1}{1+\text{SNR}^{-1}}$, $\rho_{\text{rspatial}} = \left(1 - \frac{B_n}{B_{\text{nc}}}\right)$, $\rho_{\text{aspatial}} = \left(1 - \frac{B_a}{B_{\text{ac}}}\right)$ 。 B_n 和 B_a 分别为垂直轨迹和沿轨迹基线, B_{nc} 和 B_{ac} 分别为它们的极限长度,且有

$$B_{\text{nc}} = \frac{\lambda r \tan(\theta - \alpha)}{n_{\text{factor}} \rho_r}, \quad B_{\text{ac}} = \frac{\lambda r}{n_{\text{factor}} \sin \varphi \rho_a} \quad (11)$$

其中 ρ_r 、 ρ_a 分别为斜距向和方位向分辨率, φ 为等效斜视角。 α 为被观测地面在距离向的斜度, 当地面距离向斜坡迎着雷达波束时, α 取正值, 否则取负值。

计算 Γ 的逆 Γ^{-1} , 并将其与式(10)代入式(8), 得其测高误差为

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{2N_{\text{look}}} \left(\frac{r\lambda \sin\theta}{2\pi n_{\text{factor}} B_n} \right)^2 \frac{1-\rho^2}{\rho^2} \quad (12)$$

式(12)对 B_n 求导, 令导数为零, 即可求出垂直迹基线的最优长度。因为 DSS-SAR 中基线与小卫星群的空间构形紧密相关, 下面分析 Cartwheel^[1] 和 Pendulum^[10] 两种国际上比较流行的空间构形的最优垂直迹基线长度。

6.1 Cartwheel

Cartwheel 空间构形^[1] 中, 小卫星的绕飞轨迹为一个位于轨道平面内、且长半轴与短半轴之比为 2 的椭圆。它的沿迹基线与垂直迹基线相互耦合, 设 $B_a = \beta B_n$, 根据轨道构成有 $0 \leq \beta \leq 1.22$ ^[6], 代入式(12), 令其对 B_n 的导数为零, 得到一个 6 次代数方程为

$$\left(1 - \frac{B_n}{B_{nc}}\right) \left(1 - \frac{\beta B_n}{B_{ac}}\right) - \left(1 - \frac{B_n}{B_{nc}}\right) \frac{\beta B_n}{B_{ac}} - \left(1 - \frac{\beta B_n}{B_{ac}}\right) \frac{B_n}{B_{nc}} - \rho_{\text{noise}}^2 \left(1 - \frac{B_n}{B_{nc}}\right)^3 \left(1 - \frac{\beta B_n}{B_{ac}}\right)^3 = 0 \quad (13)$$

根据阿贝耳定理, 高于 5 次的代数方程不能直接根据系数得到一般的显式代数解, 因此只能采用计算机迭代的方法求解方程的数值解。采用迭代法得到不同信噪比条件下最优垂直迹基线长度随 β 的变化曲线如图 2 所示。

6.2 Pendulum

Pendulum 空间构形^[10] 中小卫星沿垂直于大卫星轨道平面方向做简谐振动, 绕飞轨迹为一垂直于大卫星轨道平面的直线, 沿迹基线与垂直迹基线相对独立。在整个轨道周期内, 3 颗小卫星组成的 Pendulum 空间构形的沿迹基线只有 $B_{a\text{max}}$ 和 $(1/2)B_{a\text{max}}$ 两种取值。代入式(12), 令其对 B_n 导数为零, 得到一个 3 次代数方程为

$$\left(1 - \frac{B_{n\text{opt}}}{B_{nc}}\right)^3 - \frac{2}{b^2} \left(1 - \frac{B_{n\text{opt}}}{B_{nc}}\right) + \frac{1}{b^2} = 0 \quad (14)$$

式中 $b = \rho_{\text{noise}} \rho_{\text{aspatial}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}} \cdot \left(1 - \frac{B_a}{B_{ac}}\right)$ 。利用卡尔丹公

式, 并考虑条件 $0 < \frac{B_{n\text{opt}}}{B_{nc}} < 1$, 可求得 Pendulum 空间构形的最优垂直迹基线长度为

$$B_{n\text{opt}} = \left\{ 1 - \frac{2\sqrt{6}}{3b} \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{3\sqrt{6}}{8} b \right) - \frac{2\pi}{3} \right] \right\} \cdot B_{nc} \quad (15)$$

它随参数 b 的变化曲线如图 3 所示。

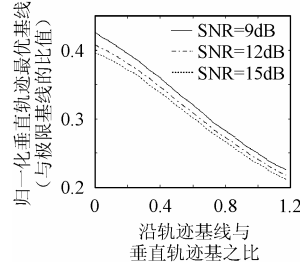


图 2 不同信噪比条件下 Cartwheel 空间构形的最优垂直迹基线

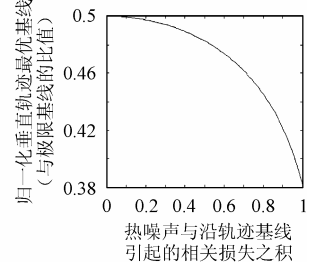


图 3 3 颗小卫星构成 Pendulum 空间构形的最优垂直迹基线

单星 SAR 干涉是 DSS-SAR 干涉的特殊情况, 单星条件下仅存在垂直迹基线, 即 DSS-SAR 中 $\beta=0$ 或 $b=1/(1+\text{SNR})^{-1}$ 的情况。观察图 2 和图 3 可以看出, 单星条件下归一化最优垂直迹基线长度在 0.4 到 0.5 之间 (Pendulum 构形中取 $\text{SNR} = 12\text{dB}$), 这与文献[2]给出的计算结果相吻合。另外, 从图 2 知道, Cartwheel 构形中两种基线耦合程度最大, 即 β 最大时, 归一化最优垂直迹基线长度接近于 0.2, 这与文献[10]采用的垂直迹基线设计值为 $0.2B_{nc}$ 相吻合。

7 结束语

本文讨论了 DSS-SAR 三维地形成像的最优垂直迹基线问题, 提出了一种最优垂直迹基线的确定方法。根据估计理论, 给出了采用最大似然法估计干涉相位的 C-R 界, 在仅考虑干涉相位估计误差的情况下得到了测高误差与垂直迹基线之间的定量关系式, 并由此得到了最优垂直迹基线的计算式。

需要说明的是本文在推导最优垂直迹基线计算式时, 忽略了斜距、基线等测量误差引起的测高误差, 这是因为它们对最优垂直迹基线的推导影响很小。主要原因有: (1) 这些误差因素引起的测高误差仅受最长垂直迹基线的影响; (2) 它们随最长垂直迹基线的变化是单调递减的; (3) 这些测量误差随着测量技术的不断改进会不断减小, 基线测量误差对测高精度的影响则可通过设置地面标志点来减小。

参考文献

[1] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001,

- 39(3): 506 – 520.
- [2] Rodriguez E, Martin J M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(2): 147 – 159.
- [3] 徐华平, 周荫清, 李春升. 星载干涉 SAR 中的基线问题. *电子学报*, 2003, 31(3): 437 – 439.
- [4] Li F K, Goldstein R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(1): 88 – 96.
- [5] Just D, Bamler R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radars. *Applied Optics*, 1994, 33(20): 4361 – 4368.
- [6] 徐华平. 分布式小卫星合成孔径雷达理论与方法研究. [博士学位论文], 北京:北京航空航天大学研究生院, 2003 年.
- [7] Lee J S, Hoppel K W, *et al.*. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017 – 1027.
- [8] Lombardo P, Lombardini F. Multi-baseline SAR interferometry for terrain slope adaptivity. Proceedings of IEEE 1997 National Radar Conference, Syracuse, NY, U.S.A., 1997: 196 – 201.
- [9] 范特里斯 H L 著, 毛士艺, 周荫清, 张其善译. 检测、估计和调制理论, 卷 I, 检测、估计和线性调制理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 72 – 84.
- [10] Fiedler H, Krieger G, *et al.*. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, 150(3): 87 – 96.
- 徐华平: 女, 1977 年生, 博士, 从事信息获取与处理、高分辨率雷达成像、干涉 SAR、SCANSAR、分布式小卫星 SAR 等方面的研究工作.
- 周荫清: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 从事信号与信息处理、雷达系统仿真、高分辨率雷达成像、电子对抗、时空二维自适应信号处理、分布式小卫星等方面的研究工作.
- 李春升: 男, 1963 年生, 教授, 博士, 从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像、时空二维信号处理、时变谱估计等方面的研究工作.