

地面粗糙起伏对分布式小卫星 SAR 回波信号相关性影响分析

刘楠 张林让 易予生 刘昕

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 该文讨论了地面的粗糙和起伏对分布式星载 SAR 回波信号相关性的影响。首先利用小平单元理论建立了粗糙地面的散射模型, 并对其统计特性进行了分析; 之后, 以服从瑞利分布的二维相关随机过程作为地面的起伏模型对分布式星载 SAR 起伏地面回波信号的相关性进行了仿真分析。仿真结果表明当分布式小卫星基线垂直航向分布时, 地面的起伏对回波间的相关性影响较大; 而分布式小卫星基线沿航线分布时, 地面起伏对其回波间的相关性影响则相对较小。

关键词: 分布式小卫星; SAR; 粗糙起伏地面; 回波相关性

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0893-05

A Study of the Influence of Ground Fluctuation and Roughness on the Correlation Between Distributed Small Satellites SAR Echoes

Liu Nan Zhang Lin-rang Yi Yu-sheng Liu Xin

(National Key Lab for Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: This paper deals with the influence of ground fluctuation and roughness on the correlation between distributed Satellites SAR echoes. The model for a rough surface is presented based on the facet theory followed by the analysis of its statistical scattering property. Their influences are shown with several simulation results, where the terrain fluctuation is imitated with a 2-dimension correlative stochastic process, which indicate that the ground fluctuation and roughness deteriorate the correlation if the two satellites are cross-track separated, but have a little influence on the correlation if the two satellites are along-track separated.

Key words: Distributed satellites; SAR; Terrain fluctuation and roughness; Echoes correlation.

1 引言

分布式小卫星合成孔径雷达是由多颗小卫星编队飞行以组成阵列来实现对地观测的一种新雷达体制, 一经提出便得到了广泛的关注和研究。基于沿航向干涉^[1](ATI)技术的动目标检测和地形高程测量^[2]是这一雷达体制的两个主要目的, 两者都是通过 SAR 图像对像素相位干涉处理来实现的。只有各分布式平台接收到的回波间具有良好的相关性, 这种相位干涉处理才能得到好的处理性能。

对于单个散射点的回波而言, SAR 成像处理并不能将其恢复成一个冲激函数, 而是通过二维脉冲压缩形成一个二维分布的点散布函数(尽管可以通过加窗压低旁瓣), 所以 SAR 图像中的一个复像素点实际上是许多散射点的点散布函数的叠加。这些散射点到两颗卫星的波程差是不同的, 这种差异就会在两幅 SAR 图像中对应复像素点间产生去相关效应^[2], 最终会影响高程测量的精度和动目标检测时杂波相消的程度。从回波信号快时间谱和慢时间谱的角度分析, 去相关效应是由于不同的卫星接收到的带限信号截取了不同的

地面散射系数谱段造成的^[3]。文献[4, 5]给出了平坦均匀地面单星双航过和分布式双星单航过模式下的噪声去相关、基线去相关、旋转去相关、体散射去相关和多普勒中心去相关的计算公式, 并分析了各种影响 SAR 图像间相关性的主要因素。

但是, 由于地面的散射系数与其粗糙度、电磁波的入射角和散射角(本文称之为入射-散射角对)有密切的关系, 粗糙地面的散射系数统计特性在不同入射-散射角对下是不同的。对同一地面区域而言, 两个入射-散射角对的散射系数之间的二阶统计特性也会随着这两个入射-散射角对的改变而改变。由于地面粗糙度和由地形起伏引起的入射-散射角对变化的复杂性, 在分析回波相关性时通常将地面散射系数视为一个独立同分布的零均值随机过程, 并采用其方差来进行分析^[2, 4, 5]。这种分析方法对于平坦均匀的粗糙地面是合适的, 因为此时在一个散射点周围相当范围内各颗卫星的入射-散射角对是近似不变的, 可以认为其散射系数之间的二阶统计特性也是不变的。但是当地形存在起伏的时候, 每颗卫星的入射-散射角对都会在整个场景范围内发生剧烈变化, 并且可能出现遮挡现象, 不能再认为其散射系数间的二阶统计特性是相同的。因此, 需要研究新的模型才能衡量地面的粗糙和起

伏对回波相关性的影响。

一块地面区域的散射场是由在该区域上连续分布的所有散射点散射场的矢量和。如果将这一区域视为一个小平面单元,使用小平面单元理论的积分来近似该区域内所有散射点散射场的矢量和,由此计算得到的散射系数是随入射-散射角对的变化而变化的。但是,通常使用的小平面单元都是理想平面,不能反映地表面粗糙度。因此,本文在理想的小平面单元平面上叠加独立同分布的正态二维随机噪声,用这样的小平面单元模型来作为粗糙地面的散射模型,并采用二维相关随机过程来作为整个场景范围内地面起伏模型。在计算回波相关系数时,首先按某种地面起伏统计特性生成一幅确定的起伏场景,再利用文献[6]中的方法生成该场景的回波数据,最后计算这些回波数据间的相关系数。但是由于一幅确定场景回波间的相关系数还不足以反映出在该地面起伏统计特性条件下的回波相关性,所以需要计算若干幅都服从该起伏统计特性的确定场景的回波相关系数,这些相关系数的均值才能反映出在该地面起伏统计特性条件下的回波相关性。当然,影响回波信号相关性的还有如热噪声、体散射随时间变化和轨道不平行等因素^[4, 5]。但这些因素并不是本文考虑的主要因素,在此将其忽略。

2 SAR 图像复像素点对的相关系数

分布式卫星群中第 i 颗卫星接收到的位于地面坐标 (x_0, r_0) 的点目标回波成像后的点散布函数^[2]为

$$w_i(x, r) \Big|_{x_0, r_0 = (r_{T0} + r_{R0})/2} = f(x_0, r_0) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (r_{T0} + r_{R0}) \right] \cdot \text{sinc} \left(\frac{x - x_0}{\rho_x} \right) \text{sinc} \left(\frac{2r - (r_{T0} + r_{R0})}{2\rho_r} \right) \quad (1)$$

式中 $f(x_0, r_0)$ 为点目标的散射函数, x, r 分别为方位向和斜距向的坐标。 r_{R0} 和 r_{T0} 分别是成像中心时刻收、发卫星到点目标的斜距; ρ_x, ρ_r 为方位向和斜距向的分辨率。在 SAR 图像中位于 (x_0, r_0) 的复像素值为

$$S_i(x_0, r_0) = \iint f(x, r) w_i(x_0, r_0) \Big|_{x, r} dx dr \quad (2)$$

两幅 SAR 图像中对应像素点对之间的相关系数为^[2]

$$\rho = \frac{\langle S_i(x_0, r_{0i}) S_j^*(x_0, r_{0j}) \rangle}{\sqrt{\langle S_i(x_0, r_{0i}) S_i^*(x_0, r_{0i}) \rangle \langle S_j(x_0, r_{0j}) S_j^*(x_0, r_{0j}) \rangle}} \quad (3)$$

$$\langle S_i(x_0, r_{0i}) S_j^*(x_0, r_{0j}) \rangle = \iint \iint \langle f_i(x_i, r_i) f_j^*(x_j, r_j) \rangle \cdot w_i(x_0, r_{0i}) \Big|_{x_i, r_i} w_j^*(x_0, r_{0j}) \Big|_{x_j, r_j} dx_i dr_i dx_j dr_j \quad (4)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示集合平均; $\langle f_i(x_i, r_i) f_j^*(x_j, r_j) \rangle$ 为地面任意两点散射系数间的相关函数,通常用整个场景范围内的平均散射截面积 σ_0 来代替^[2, 4, 5]。但是,对于由地面粗糙和起伏引起的散射系数间的二阶统计特性在场景范围内急剧变化的现象,采用统一的 σ_0 来代替任意两点散射系数间的相关函数是

不合适的。要解决这一问题,小平面单元模型是一个合适的模型,在下一节中将对此作具体阐述。

3 粗糙小平面单元模型

3.1 小平面单元散射系数

实际的地面是由连续分布的无穷多个散射点组成的,因此很难基于单个散射点来描述散射函数随视角的变化以及由于地面粗糙度造成的散射系数随机变化。为了能更好地反映散射系数的这两个性质,可以采用大量与场景相切且尺寸大于波长、但远小于雷达分辨单元的四边形平面单元来描述地面,其电磁散射特性取决于小平面单元的表面粗糙度和介电常数^[7]。文献[7]详细地介绍了小平面单元散射理论,本文将采用其中提供的公式来计算小平面单元的散射系数。

3.2 粗糙小平面单元散射系数的统计特征

粗糙表面的散射系数是一个随机变量。为了描述其统计特性,本文用如下粗糙小平面单元模型^[8]作为粗糙表面的散射模型,即令小平面单元(如图1所示)的方程^[8]为

$$z = -\frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y + n(x, y) \quad (5)$$

式中 $n(x, y)$ 为独立并服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布的二维随机过程,这里将其叠加在一个光滑的小平面上用以反映地表面的粗糙。根据小平面单元散射系数的计算公式^[7],其统计均值^[8]为

$$\begin{aligned} E(f) &= F \int_A \exp \left[j(v_x x + v_y y + v_z \left(-\frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y + n(x, y) \right)) \right] dA \\ &= F \varphi_n(v_z) \text{sinc} \left[\left(v_x - \frac{a}{c}v_z \right) L_x \right] \text{sinc} \left[\left(v_y - \frac{b}{c}v_z \right) L_y \right] \\ &= F \varphi_n(v_z) I(\boldsymbol{\nu}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 F 为与极化有关的小平面单元 Fresnel 系数^[7, 8]; $\boldsymbol{\nu} = \mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s$, \mathbf{k}_i 和 \mathbf{k}_s 分别是入射波和散射波的波数矢量(如图1所示); $\varphi_n(v_z) = \exp \left(-\frac{1}{2} \sigma^2 v_z^2 \right)$ 是叠加在小平面表面的噪声 $n(x, y)$ 的特征函数; $2L_x, 2L_y$ 为小平面单元在水平面上的投影的方位向和距离向尺寸。

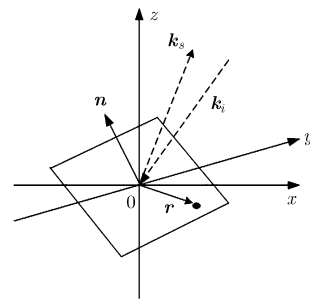


图1 小平面单元模型

任意一个粗糙小平面单元在两个入射-散射角对下得到的散射系数间的协方差为

$$\begin{aligned}
 C[f(\mathbf{k}_{i1}, \mathbf{k}_{s1})f^*(\mathbf{k}_{i2}, \mathbf{k}_{s2})] &= E\{[f(\mathbf{k}_{i1}, \mathbf{k}_{s1}) - E(f(\mathbf{k}_{i1}, \mathbf{k}_{s1}))] \\
 &\cdot [f(\mathbf{k}_{i2}, \mathbf{k}_{s2}) - E(f(\mathbf{k}_{i2}, \mathbf{k}_{s2}))]^*\} = F_1 F_2^* \int_A \int_A \exp\left\{j\left[\left(v_{x1} - \frac{a}{c}v_{z1}\right)x_1 + \left(v_{y1} - \frac{b}{c}v_{z1}\right)y_1\right] - j\left[\left(v_{x2} - \frac{a}{c}v_{z2}\right)x_2 + \left(v_{y2} - \frac{b}{c}v_{z2}\right)y_2\right]\right\} E\{[\exp(jv_{z1}n(x_1, y_1)) - E(\exp(jv_{z1}n(x_1, y_1)))] \\
 &\cdot [\exp(-jv_{z2}n(x_2, y_2)) - E(\exp(jv_{z2}n(x_2, y_2)))]^*\} dA_1 dA_2 \\
 &= F_1 F_2^* [\varphi_n(v_{1z} - v_{2z}) - \varphi_n(v_{1z})\varphi_n(-v_{2z})] I(\boldsymbol{\nu}_1 - \boldsymbol{\nu}_2) \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中各符号的意义同式(6), 符号下标中的序数对应不同的入射-散射角对。由于不同入射-散射角对的 $\boldsymbol{\nu}$ 是不同的, 那么由式(7)可以得知: 同一地面单元在两个入射-散射角对下得到的散射系数之间的二阶统计特性是非平稳的。与式(7)的推导过程相似, 两个不同的粗糙小平面单元的散射系数间的协方差为

$$\begin{aligned}
 C[f_1 f_2^*] &= F_1 F_2^* [\varphi_n(v_{1z})\varphi_n(-v_{2z}) - \varphi_n(v_{1z})\varphi_n(-v_{2z})] \\
 &\cdot I_1(\boldsymbol{\nu}_1) I_2(-\boldsymbol{\nu}_2) = 0 \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中符号下标中的序数对应不同的小平面单元。由式(8)可知, 采用粗糙小平面单元模型得到的不同地面区域的散射系数之间是不相关的, 这与文献[2,4,5]中的假设也是一致的。

3.3 基于粗糙小平面单元模型的 SAR 图像像素点相关系数

综合前面的分析, 由式(3), 式(7), 式(8)即可得到在粗糙小平面单元模型下的 SAR 图像对复像素点间的相关系数:

$$\rho = \frac{C[S_i(x_0, r_{0i})S_j^*(x_0, r_{0j})]}{\sqrt{C[S_i(x_0, r_{0i})S_i^*(x_0, r_{0i})]C[S_j(x_0, r_{0j})S_j^*(x_0, r_{0j})]}} \quad (9)$$

式中 $C[S_i(x_0, r_{0i})S_j^*(x_0, r_{0j})]$ 表示复像素点间的自协方差或互协方差。复像素点间的自协方差和互协方差可以由下式计算得到:

$$C(S_i S_j^*) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C(f_i f_j^*) W(x_0, r_{0i})|_{x_{ik}, r_{ik}} W^*(x_0, r_{0j})|_{x_{jk}, r_{jk}} A_k^2 \quad (10)$$

式中 A_k 为场景范围内第 k 个小平面单元。在粗糙小平面单元模型下地面的散射系数不再服从零均值分布, 所以本文采用像素点的协方差来计算其相关系数。

4 地面起伏模型

对于地表面的粗糙度可以用独立同分布的二维随机过程作为其概率模型^[9], 但是整个场景范围内的地面的随机起伏却是一种相关的随机起伏。因此, 应当使用相关同分布的二维随机过程作为场景地面随机起伏的概率模型。本文采用文献[9]中的方法来产生相关同分布的二维随机表面。用于产生高斯相关的二维随机过程的滤波器加权系数^[9]为

$$\omega(x, y) = \frac{2}{\sqrt{\pi L_x L_y}} \exp\left\{-2\frac{x^2}{L_x^2} - 2\frac{y^2}{L_y^2}\right\} \quad (11)$$

其中 L_x, L_y 分别是 x 轴和 y 轴方向上的相关长度。通常使用服从瑞利分布的二维随机过程来模拟地面。根据瑞利分布与高斯分布的关系, 可以得到服从瑞利分布的高斯相关二维随

机过程:

$$z(x, y) = \sqrt{z_1^2(x, y) + z_2^2(x, y)} \quad (12)$$

$z_1(x, y), z_2(x, y)$ 都是服从 $N(0, \delta^2)$ 相关随机过程; $z(x, y)$ 为服从瑞利分布的相关随机过程, 其均值为 $\delta\sqrt{\pi/2}$, 均方差为 $\delta\sqrt{(4-\pi)/2}$ 。由此得到的随机起伏表面以及其统计特性如图 2 和图 3 所示:

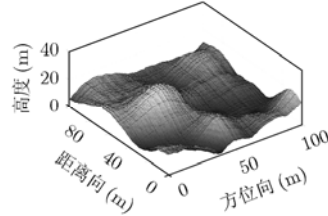


图 2 随机起伏三维 DEM 模拟图

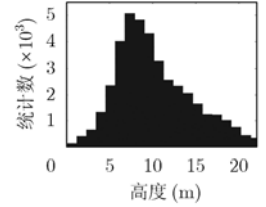


图 3 随机起伏表面小平面单元高度分布直方图

5 仿真分析

本文以粗糙小平面单元模型作为粗糙地面的散射模型, 以服从瑞利分布的二维相关随机过程作为地面起伏模型, 对多种卫星群空间配置和地面参数条件下回波的相关性进行仿真分析。仿真时, 首先产生一幅大小为 151×151 个分辨单元(方位 \times 距离)的起伏地面场景, 令其相关长度等于其起伏的均值; 将每个地面分辨单元均匀划分为 9 个粗糙小平面单元, 根据文献[7]中的方法来确定被遮挡区; 根据地形的起伏数据和卫星天线的位置来确定每个小平面单元的入射和散射波数矢量, 并根据式(7)来计算各小平面单元散射系数间的协方差; 用文献[6]的方法来计算每个小平面单元回波成像后的点散布函数; 最后将得到的小平面单元散射系数协方差及其回波成像后的点散布函数代入式(9), 式(10)计算该场景回波的相关系数; 对每种卫星群空间配置和地面参数都进行 250 次独立试验, 取其均值作为该条件下的回波相关系数。具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

卫星高度	500/700km	天线方位向尺寸	5m
波长	0.03m	天线视角	32°
信号带宽	60MHz	分辨率(方位距离)	2.5m \times 2.5m

5.1 双星编队仿真结果

在这种编队配置下有两颗卫星同时工作, 其基线配置如图 4 所示。卫星 S1 工作在主动发射模式, 卫星 S2 工作在被动接收模式。图 5 和图 6 分别给出了不同的地面起伏条件下两颗卫星的回波相关系数随垂直航向基线和沿航向基线长度的变化情况。图中 σ 表示地面起伏的均方差。

仿真结果表明：在垂直航向基线配置条件下，当地面起伏很小($\sigma=0.5\text{m}$)的时候回波的相关系数随着基线长度线性的降低，这与文献[2,4,5]中的均匀平坦地面的结果是一致的。但当地面起伏程度加剧之后，回波的相关系数明显恶化，可以看到在同等基线长度条件下地面起伏的均方差越大回波相关系数越低。而在沿航向基线配置条件下，地面的起伏对回波相关性的影响并不明显，3种不同的地面起伏条件下回波相关系数曲线是基本重合的。此时影响回波相关性的主要还是基线长度，相关系数随基线长度的下降曲线近似为一条抛物线。另外，无论垂直基线还是沿航向基线，可以看到在高轨道条件下的回波相关性明显好于低轨道的情况。

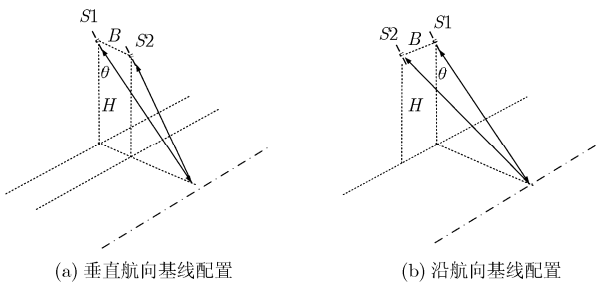


图4

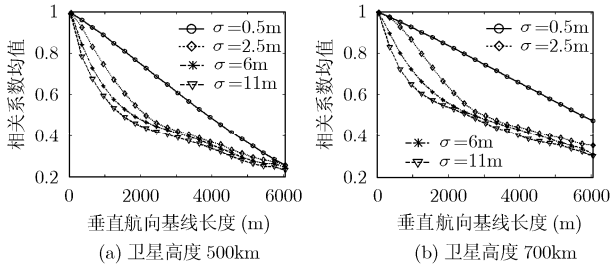


图5 垂直航向基线配置

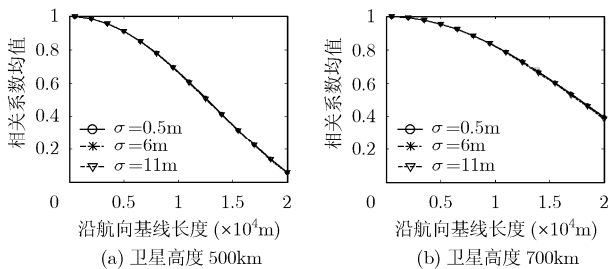


图6 沿航向基线配置

5.2 三星编队仿真结果

在这种编队配置下有3颗卫星同时工作，以模拟Cartwheel编队构型^[10]的空间卫星配置，其基线配置如图7所示，卫星S1到S2和S3基线中点的距离为160km。卫星S1工作在主动发射模式，卫星S2，S3工作在被动接收模式。图8和图9分别给出了不同的地面起伏条件下卫星S2,S3的回波相关系数随S1,S2间垂直航向基线和沿航向基线长度的变化情况。

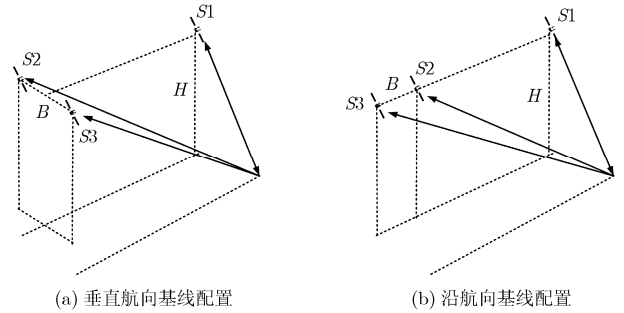


图7

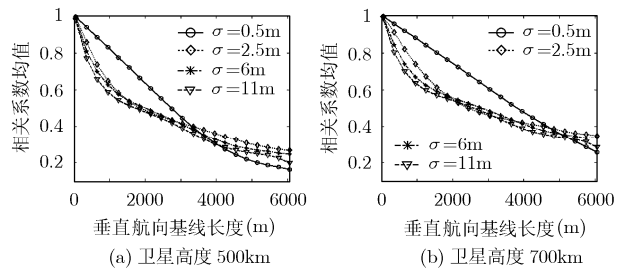


图8 垂直航向基线配置

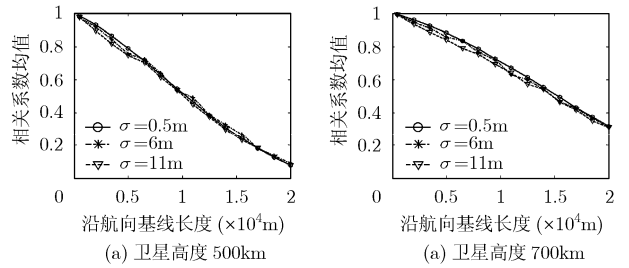


图9 沿航向基线配置

仿真的结果与双星编队的结果基本相似。垂直航向基线配置下回波相关性受地面起伏的影响非常严重，地面的起伏会导致回波相关性的恶化。而沿航向基线配置下的回波相关性在这种编队体制下受地面起伏的影响要比在双星编队下受到的影响明显，其相关系数随基线长度的下降曲线也变为了近似线性的。

6 结束语

本文在小平面单元模型的基础上建立了粗糙表面的散射模型，并分析了其统计特征，得出了在粗糙小平面单元模型下的 SAR 图像对像素点间相关系数计算公式。并以服从瑞利分布的二维相关随机过程作为地面的起伏模型。对多种卫星群空间配置和地面参数条件下回波的相关性进行了仿真分析。仿真结果表明地形的起伏会严重影响垂直航向基线配置下回波相关性，地形起伏的程度越大回波间的相关性越差。而在沿航向基线配置下回波相关性受到的影响却不大，对其相关性有较大影响的是基线长度。如果基线长度过长则应当先进行预滤波以提高像素点间的相关性。

参考文献

- [1] Pascazio V, Schirinzi G and Farina A. Moving target detection by along-track interferometry. IGARSS, Sydney, 2001: 3024-3026.
- [2] Zebker H A and Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 180-191.
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2004, 278-316.
- [4] 张丘玲, 冯宏川, 王岩飞. 分布式卫星 INSAR 信号的相关性分析. *数据采集与处理*, 2005, 20(1): 70-74.
- [5] 徐华平, 周荫清, 李春升. 分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性. *电子学报*, 2005, 33(6): 965-969.
- [6] 张平, 张林让, 刘冰. 分布式星载 SAR 原始数据模拟. *雷达科学与技术*, 2005, 3(5): 292-296.
- [7] 万峰, 岳海霞, 杨汝良. 星载 SAR 分布目标原始数据模拟. *电子与信息学报*, 2004, 26(8): 1250-1255.
- [8] Franceschetti G, Iodice A, and Riccio D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(8): 1787-1801.
- [9] Rochier J D, Blanchard A J, and Chen M F. The generation of surface targets with specified surface statistics. *INT. J. Remote Sensing*, 1989, 10(7): 1155-1174.
- [10] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.
- 刘楠: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号建模与处理、地面动目标检测.
- 张林让: 男, 1966年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理和雷达系统建模与仿真.