DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2006.04.017
2006年 4月 北京航空航天大学学报 April 2006
第32卷 第4期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.4

一种分布式小卫星SAR单视复图像信号仿真方法

徐华平 陈 杰 王宝发 周荫清

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 总结了分布式小卫星合成孔径雷达(DSS-SAR, Distributed Small Satellite Synthetic Aperture Radar)回波信号仿真所需具备的基本功能. 给出了DSS-SAR的空间几何模型和信号模型. 空间几何模型由描述小卫星编队构形的Hill方程给出, 信号模型由单视复图像信号模型、信号相关性模型和干涉相位的统计特性共同描述. 结合空间几何模型和单视复图像信号模型, 提出了一种简洁的DSS-SAR单视复图像信号的仿真方法. 该仿真方法中, 小卫星的空间位置是根据虚拟中心空间位置和小卫星的编队构形计算得到, 因此仿真时能够任意设置小卫星群的编队构形. 通过对圆锥三维地形和平地两种地面场景的进行回波信号仿真, 结果表明该仿真方法不但能够实现DSS-SAR信号仿真必须具备的功能, 而且还具有实现简洁、误差加入方便等优点.

关 键 词: 合成孔径雷达; 分布式; 仿真; 算法

中图分类号: TN 959

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0445-05

Quick method of distributed small satellite synthetic aperture radar single-look complex image simulation

Xu Huaping Chen Jie Wang Baofa Zhou Yinqing

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The basic requirements for echo simulation of DSS-SAR(distributed small satellite synthetic aperture radar) were concluded. The geometry model and signal model of DSS-SAR were presented. Hill equation was employed to illustrate the configuration of small satellites. Single-look complex image signal model, correlation of DSS-SAR echoes and interferometric phase probability density function were given to show the signal characteristics of DSS-SAR. A quick method was proposed to simulate single-look complex images of DSS-SAR. The method calculated positions of small satellites with the position of the central point and the small satellite configuration. It can simulate the single-look complex image signal of the arbitrary formation small satellite cluster conveniently. The flat and conical terrains were chosen, and the simulated single-look SAR(sythentic aperture radar) complex images were obtained with the proposed method. Computer simulation results show the simulation method not only satisfies the DSS-SAR signal simulation needs, but adds many kinds of error conveniently and simulates signal realistically.

Key words: synthetic aperture radar; distributed; simulation; algorithm

分布式小卫星合成孔径雷达(DSS-SAR, Distributed Small Satellite Synthetic Aperture Radar)是一种基于干涉原理成像的新型SAR(Sythentic Aperture Radar)系统, 它具备大测绘带、高分辨率成像, 三维地形成像和洋流成像3种系统功能[1]. 目前国际上还没有在轨运行的DSS-SAR系统, 无法得到其真实的回波数据. DSS-SAR系统总体指标分析与设计、误差分析及补偿、数据处理方法研究等工作只能利用仿真数据来进行. 因此, DSS-SAR回波信号仿真方法的研究极为重要.

收稿日期: 2005-04-20

作者简介: 徐华平(1977—), 女, 陕西渭南人, 博士, huaping_xu@sina.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

DSS-SAR 回波信号之间的相关性由系统热噪声、基线以及处理误差等决定，由此看来，DSS-SAR 与单星干涉 SAR 信号间相关性的形成过程基本相同，其信号仿真可以借鉴单星干涉 SAR 的仿真方法.近几年来有关干涉 SAR 信号仿真的文献很多[2~11]，比较经典的有：①Li 等人[2]直接根据所建立的随机信号模型生成干涉 SAR 复图像.该方法没有考虑平台因素.②Dupont 等人[3]给出的 SAMI 干涉 SAR 仿真系统.该仿真系统信号间相关性依然是根据 Li 给出的随机信号模型确定的.③加拿大 CCRS 的 Xu 等人[4]给出了一种重复轨迹星载干涉 SAR 回波仿真方法.此方法仍采用数学计算加入干涉 SAR 复图像对之间的相关特性.④Franceschetti 等人[5]在意大利 Alenia 的 SAR 原始信号仿真系统 SARAS[12]的基础上发展了一种依照干涉 SAR 信号的生成机理、自然形成相关性的信号仿真方法，但实现过程非常复杂.

DSS-SAR 中小卫星之间的几何关系依赖于小卫星的轨道构成，它不仅随时间变化，而且卫星间的距离(或基线)是一个三维立体的关系.因此与常规干涉 SAR 相比，DSS-SAR 回波信号仿真更为复杂.本文在总结 DSS-SAR 回波仿真所需具备的基本功能的基础上，借鉴干涉 SAR 回波仿真的思想，结合 DSS-SAR 空间几何关系和信号模型，提出了一种 DSS-SAR 单视复图像信号仿真方法，该方法实现简洁，而且只需稍做改变就可以实现 DSS-SAR 原始回波信号的仿真.

1 所需具备的基本功能

DSS-SAR 回波信号由多颗小卫星的 SAR 回波信号构成，但又不是独立的单星 SAR 回波信号的简单组合，其各颗小卫星回波信号之间具有一定的相关性，这也是 DSS-SAR 干涉成像的关键.根据对 DSS-SAR 成像机理和数据处理的分析，本文给出 DSS-SAR 信号仿真需具备的基本功能：

1) 能够生成三维地形的散射特性数据.该三维地形可以是仿真生成的某种特殊地形的数字高度图(DEM，Digital Elevation Map)数据，也可以是某已知地区的 DEM.

2) 能够体现 SAR 图像中的迎波缩短，顶底倒置，遮挡效应等，这是因为实际 SAR 图像中存在着大量的这类现象，而且它们对相位展开精度的影响很大.

3) 能够反映平台的运动特性，可以加入波束控制误差和三轴姿态误差等.这项功能是为了研究干涉 SAR 数据处理中的运动补偿算法和姿态误差对三维地形成像处理的影响等.

4) 回波信号之间必须具备 DSS-SAR 信号的相关特性，因此仿真中必须包括 3 个方面的内容：①热噪声的仿真，即在回波信号中需要加入一定信噪比的热噪声；②空间基线的仿真，两次回波之间的空间基线参数根据实际要求是可以改变的；③SAR 成像处理过程引起的相关损失.

5) 可以加入距离向偏移和方位向偏移等图像不匹配误差，有助于对图像配准算法的研究.

2 空间几何模型与信号模型

2.1 DSS-SAR 的空间几何模型

DSS-SAR 中小卫星相对于地面目标的空间几何关系，与单星 SAR 的空间几何模型[13]相同.因此这里主要给出 DSS-SAR 中小卫星之间的相对位置关系，即编队小卫星群的空间构形.

DSS-SAR 中编队小卫星群的空间构形是小卫星的近距离编队飞行问题，可以采用 Hill 方程来近似.Hill 方程在绕地球转动的参考坐标系 $Oxyz$ 内利用差分方程来描述小卫星间的相对运动.该转动参考坐标系 $Oxyz$ 以空间某一中心点(虚拟卫星)为原点，以它的飞行方向为 y 轴，x 轴在轨道平面内、背向地心方向，z 轴垂直于轨道平面、并与 y 和 x 构成右手坐标系.对于不考虑摄动的开普勒运动，当虚拟卫星轨道为圆形，轨道周期为 T_0 时，得到 Hill 方程的一个解析解，即小卫星 Sat_k 相对于虚拟卫星的绕飞轨迹为[14]

$$\left.\begin{aligned} x_k(t) &= A_k\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}t+\alpha_k\right)\\ y_k(t) &= \Delta y_k-2A_k\cos\left(\frac{2\pi}{T_0}t+\alpha_k\right)\\ z_k(t) &= C_k\sin\left(\frac{2\pi}{T_0}t+\beta_k\right)\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式中 A_k，C_k，α_k 和 β_k 与小卫星 Sat_k 的初始位置和速度有关.

2.2 DSS-SAR 的回波信号模型

2.2.1 单视复图像信号模型

DSS-SAR 的单视复图像信号模型表示为地面目标散射系数乘以由雷达与目标之间的相对距离引起的相位项，再相继与距离向和方位向脉冲压缩结果的卷积.对于收发分置 DSS-SAR 系统，小卫星 Sat_k 的单视复图像表示为[15]

$$s_k(r,x)=\sigma(r,x)\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}(r_k+r_s)\right\}\cdot$$

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\exp\left\{-\mathrm{j}\pi f_{\mathrm{d}}\frac{x}{V}\right\}\otimes[w_{\mathrm{r}}(r)w_{\mathrm{a}}(x)]+g \quad (2)$$

其中　$\sigma(r,x)$为后向散射系数;λ 为雷达波长;f_{d} 为 Sat_k 的多普勒中心频率;r_k 和 r_{s} 分别表示 Sat_k 和发射信号卫星 Sat_{s} 相对于地面目标的斜距;r,x 分别表示斜距向和方位向坐标;V 为 Sat_k 飞行速度;$w_{\mathrm{r}}(\cdot)$和 $w_{\mathrm{a}}(\cdot)$表示点目标在距离和方位向的冲激响应函数;g 为系统热噪声,它实际上应为 $g(r,x)$,为书写方便,省略了(r,x).

收发同置 DSS-SAR 系统的单视复图像与式(2)稍有不同,具体公式见参考文献[15].

2.2.2　信号相关性模型

根据式(2)所示的信号模型,文献[16]推导了任意两颗小卫星 Sat_m 和 Sat_n 之间的相关系数为

$$\gamma_{m,n}(r,x)\approx\frac{\sigma_0\rho_{\mathrm{r}}\rho_{\mathrm{a}}}{\sigma_0\rho_{\mathrm{r}}\rho_{\mathrm{a}}+P_{\mathrm{n}}}\left(1-\frac{n_{\mathrm{factor}}B_{\mathrm{n}}\rho_{\mathrm{r}}}{\lambda r\tan(\theta-\alpha)}\right)\cdot\left(1-\frac{n_{\mathrm{factor}}B_{\mathrm{a}}\sin\varphi\rho_{\mathrm{a}}}{\lambda r}\right)\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{2\pi n_{\mathrm{factor}}}{\lambda}\Delta r\right\}\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\pi\frac{n_{\mathrm{factor}}\Delta f_{\mathrm{d}}x}{V}\right\} \quad (3)$$

σ_0 为面目标平均后向散射系数;ρ_{r},ρ_{a} 分别为 SAR 图像斜距向和方位向分辨率;P_{n} 为系统热噪声功率;B_{n} 为 Sat_m 和 Sat_n 之间的垂直轨迹基线;θ 为雷达视角;α 为地面在距离向的斜度;n_{factor} 为收发分置因子,其为 1 表示收发分置,其为 2 则表示收发同置;B_{a} 为 Sat_m 和 Sat_n 之间的沿轨迹基线;φ 为等效斜视角;Δr 和 Δf_{d} 分别为 Sat_m 和 Sat_n 之间的斜距差和多普勒中心频率偏差.

2.2.3　干涉相位统计模型

假设均匀地面散射场景为 0 均值的复高斯白随机过程,可以求得小卫星 Sat_m 和 Sat_n 回波间的干涉相位 ϕ 的概率密度函数为[17]

$$p(\phi)=\frac{1-|\gamma_{m,n}|^2}{2\pi}\frac{|\gamma_{m,n}|^2\cos^2(\phi-\phi_{m,n})}{1-|\gamma_{m,n}|^2\cos^2(\phi-\phi_{m,n})}\cdot\left\{1+\left[|\gamma_{m,n}|\cos(\phi-\phi_{m,n})\cdot\arccos\left(\frac{1}{2}-|\gamma_{m,n}|\frac{\cos(\phi-\phi_{m,n})}{2}\right)\Big\backslash\sqrt{1-|\gamma_{m,n}|^2\cos^2(\phi-\phi_{m,n})}\right]\right\} \quad (4)$$

式中　$\gamma_{m,n}$ 为 s_m 和 s_n 的复相关系数;$\phi_{m,n}=\arg(\gamma_{m,n})$;$\arg(\cdot)$表示取括号内复数的幅角.从式(4)看出,$p(\phi)$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,$p(\phi)$在均值 $\phi_{m,n}$ 处具有最大值,且关于该最大值对称.

3　DSS-SAR 单视复图像仿真方法

根据 DSS-SAR 的几何特性和单视复图像信号特点,本文提出一种 DSS-SAR 单视复图像的仿真算法,其实现流程如图 1 所示.该 DSS-SAR 单视复图像的仿真算法主要包括小卫星位置计算,DEM 数据生成,地面散射系数计算和单视复图像生成 4 个步骤.

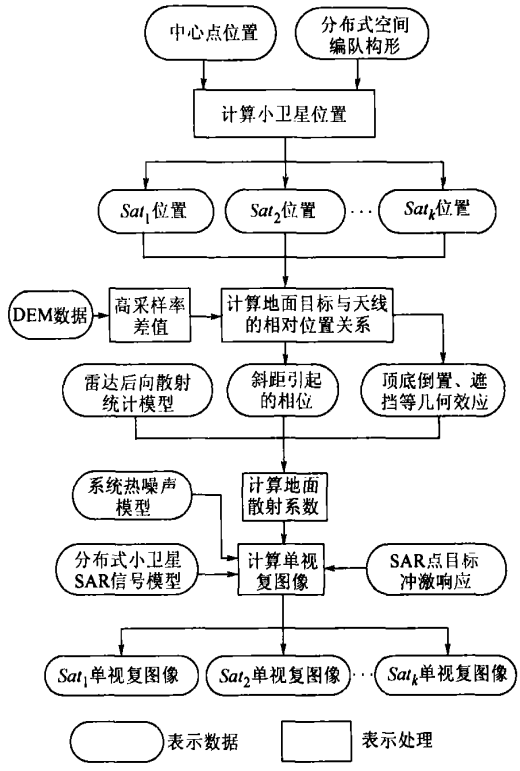


图 1　DSS-SAR 单视复图像仿真算法

1) 小卫星位置计算.根据中心点的轨道参数可以给出任意时刻的中心点位置,然后根据式(1)给出的空间编队构形中心点与小卫星之间的相对位置关系计算小卫星的位置.空间编队构形主要包括构形的形状、基线长度和卫星数目等参数.其中构形的形状和基线长度由式(1)可以确定,而卫星数目则根据需求确定.在计算小卫星位置参数时,能够比较方便地加入平台运动误差.

2) DEM 数据生成.雷达后向散射小面单元模型中,小面单元的尺寸必须大于雷达波长,小于分辨单元,一般在一个分辨率单元内放置 4×4 个小面单元就可以满足仿真的要求[5].常规地形测绘方法提供的 DEM 像素单元的尺寸都比较大,不能满足小面单元尺寸的要求,可以通过分形插值[11]的方法获得高采样率 DEM 数据.

3) 地形散射系数计算.通过 DEM 数据和卫

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

星位置可以求出目标与天线之间的相对位置关系，并以此确定顶底倒置、遮挡等几何效应和目标与天线之间的斜距．根据雷达后向散射统计模型，结合斜距和顶底倒置、遮挡几何效应，就可以计算出地形复散射系数．本文采用 Ulaby 等提供的散射系数模型[11]．波束控制误差和三轴姿态误差可以在计算目标与天线间相对位置关系时加入．

4) 单视复图像生成．根据式(2)所示的 DSS-SAR 单视复图像信号模型，将地面复散射系数与 SAR 系统点目标冲激响应卷积，并加入系统热噪声，就可以得到 SAR 单视复图像．系统热噪声采用高斯分布的白噪声．这里的点目标冲激响应可以选取理想的 sinc 函数，也可以是通过对内定标数据进行处理得到的响应函数．

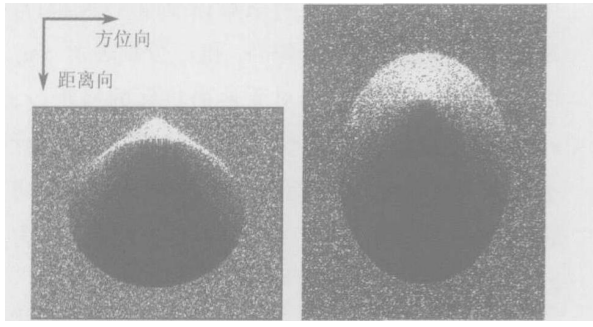
从上述给出的仿真过程看出，本文提出的仿真算法不但能够满足论文第 1 部分给出的 DSS-SAR 信号仿真的 5 项基本功能，而且还具备以下优点：①仿真信号的相关性是完全依照其产生机理形成的，能够真实地反映 DSS-SAR 信号的统计相关特性．②利用中心点位置和空间编队构形计算各颗小卫星的位置，不但简化了实现过程，而且还能够比较容易地加入小卫星间的相位运动误差．③通过地面散射系数与点目标冲激响应的卷积计算 SAR 复图像信号，点目标冲激响应可选取 SAR 成像处理器提供的真实 SAR 数据的成像结果，大大提高仿真数据的逼真程度；并能利用 FFT 在频域实现卷积，提高运算速度；若选用原始回波信号响应代替点目标冲激响应，与地面散射系数卷积，则能够生成 DSS-SAR 原始回波信号．

4 计算机仿真及结果分析

采用本文提出的 DSS-SAR 单视复图像仿真方法，生成两颗小卫星组成的 Cartwheel 构形的 DSS-SAR 系统单视复图像．为了充分说明仿真方法的有效性，分两种情况进行．

4.1 几何效应验证

为了验证仿真方法能否完全反映小卫星与地面目标之间的几何关系，体现出 SAR 图像中的迎波缩短、顶底倒置、遮挡效应等，设置地面场景为圆锥地形．图 2a 和图 2b 分别给出了其中 1 颗小卫星在 25°和 45°视角下仿真得到的圆锥三维地面场景的 SAR 单视复图像的功率图，图中横向表示方位向，竖向为斜距向．图 2a 中存在着明显的顶底倒置，图 2b 则表现出了遮挡现象．这表明，采用本文提出的仿真方法完全能够反映出由于 DSS-SAR 系统几何关系所引起的大视角遮挡和小视角迎坡缩短甚至顶底倒置的现象．

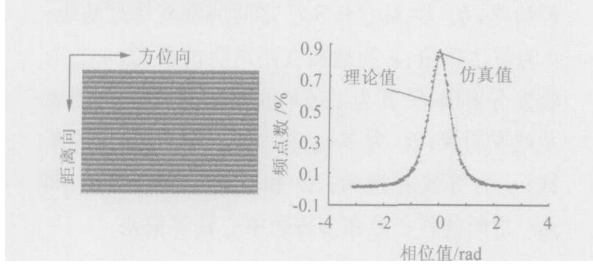


a 视角为 25°，有明显的顶底倒置现象　　b 视角为 45°，有明显的遮挡现象

图 2 同一圆锥地形场景不同视角下的单视复图像仿真结果

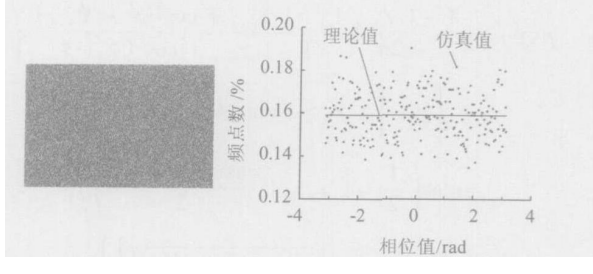
4.2 信号特性验证

为了验证仿真方法能否逼真地反映出小卫星信号间的相关特性和干涉相位统计特性，设置平地均匀地面场景．令沿轨迹基线长度为 0，图 3a 和图 4a 分别给出了两种垂直轨迹基线长度下的干涉相位图；图 3b 和图 4b 给出了相应的统计特性，实线为根据式(4)的理论计算结果，菱形点为对应干涉相位图的统计结果．



a 模糊干涉相位　　b 干涉相位的统计特性

图 3 平地地形场景的仿真结果，归一化垂直轨迹基线长度为 0.1



a 模糊干涉相位　　b 干涉相位的统计特性

图 4 平地地形场景的仿真结果，归一化垂直轨迹基线长度为 1

图 3 和图 4 的仿真结果表明，仿真方法能够逼真地反映出干涉条纹随垂直轨迹基线长度的变

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化,当垂直轨迹基线取极限值时,干涉相位图中没有清晰的干涉条纹;仿真干涉相位图的统计特性与理论值基本吻合,因此该仿真方法能够很好地模拟出干涉相位的统计特性.

不考虑热噪声的影响,分别令沿轨迹基线长度和垂直轨迹基线长度为 0,仿真平地均匀地面场景在不同垂直轨迹基线和沿轨迹基线长度下 DSS-SAR 中两颗小卫星的单视复图像,验证它们之间的相关系数随基线长度的变化情况.图 5 给出了 DSS-SAR 复图像间相关系数随基线的变化,图中的实线为根据式(3)计算的结果,离散的星图为仿真所得的结果,可以看出理论分析与仿真结果非常吻合.

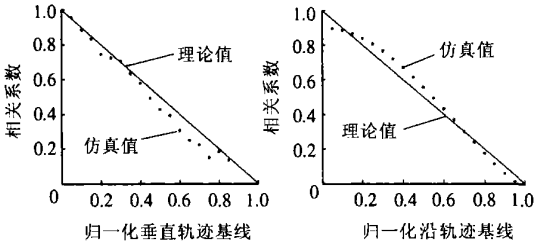


图 5　相关系数随基线长度的变化

5　结　论

本文在总结 DSS-SAR 回波信号仿真需具备的基本功能的基础上,结合其空间几何模型和回波信号模型,提出了一种简洁的 DSS-SAR 单视复图像信号仿真方法.该方法能够满足 DSS-SAR 回波信号仿真的需求;可以方便地加入编队构形误差;可通过改变目标散射系数的卷积函数,很容易地获得真实反映系统幅相误差、通道不一致等误差特性的单视复图像仿真数据.

由于本文提出的方法是通过编队构形方程来计算小卫星空间位置的,省略了计算小卫星轨道坐标的过程,因此很难直接仿真小卫星轨道误差.一种间接的方法是,通过对中心点轨道坐标加入误差来实现小卫星轨道误差仿真.

参考文献 (References)

[1] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506～520

[2] Li F K, Goldstein R M. Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(1): 88～96

[3] Dupont S, Perlant F, Berthod M. SAMI: an InSAR simulator to improve SAR calibration [A]. IGARSS '1995 [C]. Firenze, Italy: IEEE, 1995. 559～561

[4] Xu W, Cumming I. Simulator for repeat-pass satellite InSAR studies [A]. IGARSS '1997[C]. Singapore: IEEE, 1997. 1704～1706

[5] Franceschetti G, Iodice A, Migliaccio M, *et al*. A novel across-track SAR interferometry simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 950～962

[6] van der Kooij M W A, Armour B, Ehrismann J, *et al*. A workstation for spaceborne interferometric SAR data [A]. IGARSS '1996 [C]. Lincoln, NE, USA: IEEE, 1996. 339～341

[7] Sarabandi K, Lin Y C. Simulation of interferometric SAR response to deciduous and coniferous forest stands [A]. IGARSS '1997[C]. Singapore: IEEE, 1997. 1887～1889

[8] Franceschetti G, Iodice A, Migliaccio M, *et al*. Simulation of SAR interferometric raw signal pairs corresponding to real scenes [A]. IGARSS '1998[C]. Seattle, WA, USA: IEEE, 1998. 2653～2655

[9] Sarabandi K, Azadegan R. Simulation of interferometric SAR response to rough surfaces covered with a dielectric layer [A]. IGARSS '2000[C]. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000. 1739～1741

[10] De Vita F, Mori A. Raw/SLC signal simulator for spaceborne interferometric SAR systems [A]. IGARSS '2000[C]. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000. 785～787

[11] Chen J, Zhou Y Q, Li C S. Spaceborne synthetic aperture radar raw data simulation of three dimensional natural terrain [A]. 2001 CIE International Conference on Radar Proceedings[C]. Beijing, 2001. 619～623

[12] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, *et al*. SARAS: a synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110～123

[13] Wu C, Liu K Y, Jin M. Modeling and a correlation algorithm for spaceborne SAR signals [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1982, 18(5): 563～574

[14] Krieger G, Fiedler H, Mittermayer J, *et al*. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry [A]. IEE Proceedings Radar Sonar Navigation[C]. 2003, 150(3):87～96

[15] 徐华平,周荫清,李春升. 分布式小卫星合成孔径雷达单视复图像信号模型[J].电子与信息学报,2004,26(增):168～172

Xu Huaping, Zhou Yinqing, Li Chunsheng. Signal model of simple look complex image for distributed small satellite synthetic aperture radar [J]. Journal of Electronics & Infromation Technology, 2004, 26(Suppl.): 168～172(in Chinese)

[16] 徐华平,周荫清,李春升. 分布式小卫星 SAR 回波信号的相关性[J]. 电子学报,2005,33(6): 965～969

Xu Huaping, Zhou Yinqing, Li Chunsheng. Correlation of distributed small satellites SAR echoes [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(6): 965～969(in Chinese)

[17] Just D, Bamler R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radars [J]. Applied Optics, 1994, 33(20): 4361～4368

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net