基于自仿射分形建模的干涉仿真

陈依虹 袁运能

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 对合成孔径雷达干涉仿真进行了深入研究,阐述了干涉仿真的基本原理,分析了影响干涉合成孔径雷达图像质量的各种噪声干扰因素,重点讨论了干涉合成孔径雷达仿真模型以及建立准确模型的重要性. 比较了目前常用的干涉仿真模型,分析了这些模型在仿真过程中存在的缺陷,并基于自仿射分形理论建模仿真了实际的干涉过程,获得了满足合成孔径雷达空间采样率的数字高程模型. 仿真结果表明,利用自仿射分形理论仿真不仅可以真实逼真地反映自然目标场景的随机起伏特性和雷达图像特有的几何畸变现象,而且可以对去相干因素进行定量分析,同时有助于验证干涉处理算法和优化系统设计.

关 键 词: 合成孔径雷达; 干涉; 分形

中图分类号: TN 957.5

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)07-0807-04

Interferometric signal simulation based on fractal modeling

Chen Yihong Yuan Yunneng

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

Abstract: INSAR (interferometric synthetic aperture radar) signal simulation methods were investigated deeply, and the fundamental principle of the INSAR simulation was presented. Various noise interference factors in INSAR images were analyzed. The simulation model of the INSAR system was discussed in detail, which indicated that the precise model was very important for the INSAR simulation. Present general simulation models were compared and their disadvantages in INSAR simulation were also analyzed. Based on the self-affine fractal theory, the real interferometric process was simulated and the DEM (digital elevation model) satisfying space sampling rate was acquired. Results demonstrate that not only the stochastic properties and geometric distortion phenomena of ground targets, which are particular for radar interfermetry, are reflected vividly, but also the various distortion factors can be analyzed quantitatively. It is helpful to verify all kinds of interferometric arithmetics and optimize INSAR system design.

Key words: synthetic aperture radar; interferometry; fractals

干涉合成孔径雷达(INSAR, Interferometric Synthetic Aperture Radar)技术是合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)技术与干涉技术相结合的产物,其突出特点在于以相位信息作为处理和分析的焦点,能够提供地形表面的高程信息[1]. 为了对系统干涉测量功能进行系统分析并研究其信号处理方法,需要得到可进行干涉处理的复图像. 复图像可以通过实际的系统获得,但使用实际系统代价很高,而且数据不一定满足需要研究的情况,因此仿真技术是 INSAR 系统优化设计的强有力工具. 由于 INSAR 不再局限于实现常规 SAR 获取灰度图的目的,而是提取地形表面的高程信息,因此 INSAR 仿真不再侧重于考察各种因素对灰度图质量的影响,其重点在于评估各种因素对高程测量精度的影响. 仿真系统通过仿真可以把图像与具体的雷达参数、空间几何关系及雷达平台姿态有机地结合起来. 很多文献都对干涉仿真进行了研究. 文献[2]对干涉相位的估计

收稿日期: 2005-07-27

作者简介: 陈依虹(1979-),女,河北邢台人,硕士生, hbs_cyh@126.com.

进行了仿真,并考虑了几何畸变的影响,但是没有考虑去相干因素;文献[3]提出了仿真干涉数据的一种新算法,但是没有分析影响高程精度的因素. 本文对合成孔径雷达干涉仿真进行了深入研究,基于自仿射分形理论建模仿真了实际的干涉过程,既考虑了几何畸变又分析了基线去相干的影响,并将其加入仿真过程,获得了既保持地面目标表面随机起伏的特性又满足 SAR 空间采样率的数字高程模型(DEM,Digital Elevation Model).

1 仿真原理

干涉 SAR 图像是由同一部雷达天线在具有一定距离的轨道上双程飞行或者由安装在同一平台上的 2 副天线单程飞行获得的. 雷达干涉技术示意图见图 1. 图中 B 为 2 次雷达探测时天线之间的距离,又称基线;R_1,R_2 分别为 2 次探测的距离,ΔR 为两者之差. 星载 SAR 采用双程干涉,2 次探测发射和接收各自的雷达波束,因此雷达 2 次探测的距离差应当为天线到地物目标间距离的 2 倍,从而可以得到干涉相位[4]:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta R \tag{1}$$

尽管可以直接利用地面像素距离差仿真干涉相位,但在实际数据获取过程中,还存在很多干扰因素,因此需要仿真出实际干涉数据获取过程中出现的一些现象.

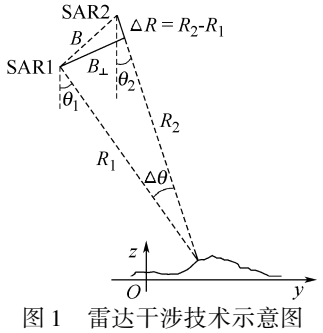


图 1 雷达干涉技术示意图

1.1 平地效应

水平地形效应现象是由于干涉 SAR 系统的几何关系引起的相同高度目标点的相位差不同. 对于高度相同的 2 相邻单元点,由于二者在距离向位置的不同,使得它们在斜距的投影存在差别,此时二者的相位差值随之改变,这就是水平地形效应[5].

1.2 影像失真效应

SAR 是侧视成像方式,这种成像的几何模式导致了雷达影像中的阴影(shadow)、透视收缩(foreshortening)和顶底倒置(layover). 如果地形有起伏就会产生影像失真,传感器接收信号的先后就会有所不同,远距离点的信号可能会落在近距离门内[6]. 因此需要将信号从地面坐标转换到雷达坐标系统中.

1.3 去相干干扰源

在 SAR 干涉测量中,干涉相干(coherence)是一个非常关键的量值. 首先它是局部干涉条纹质量的重要评价标准,其次它提供了散射体的重要信息. 因此准确地估算干涉相干是非常必要的. 影响干涉相位图像精度的去相干干扰源主要有基线引起的几何去相干、多普勒中心去相干、时间的去相干效应(如 2 次测量间隔之间目标的变化)、干涉 SAR 信号处理去相干,如匹配精度等[6]. 精确模拟加在干涉 SAR 数据上的干扰信号需要建立干扰信号模型,在此主要考虑基线引起的几何去相干干扰源. 由基线引起的几何去相干可以简单地表示为[7]

$$|\gamma_b| = \begin{cases} 1 - \dfrac{B_\perp}{B_{\perp,c}} & |B_\perp| \leqslant B_{\perp,c} \\ 0 & |B_\perp| \leqslant B_{\perp,c} \end{cases} \tag{2}$$

其中 $B_{\perp,c}$ 是极限基线,并且

$$B_{\perp,c} = \lambda\left(\frac{B_R}{c}\right)R\tan(\theta - \alpha) \tag{3}$$

其中,λ 是波长;B_R 是带宽;θ 为入射角;α 是地形坡度;R 是天线到地物目标间距离.

图 2 给出了由基线引起的几何去相干 γ_b 随基线距 B 和地形坡度 α 的变化情况.

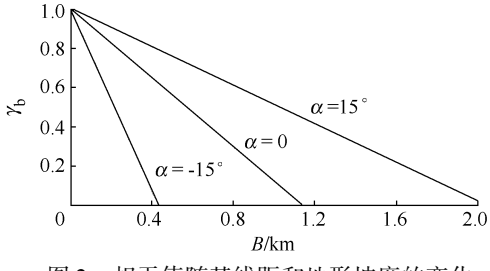


图 2 相干值随基线距和地形坡度的变化

2 建 模

很多学者都对干涉特性进行了广泛研究,他们通常采用地球上均匀分布的目标散射模型来获取这些特性,常常忽略自然界的真实地形,或者简化为简单规则形状模型(比如固定坡度的地形或者高斯体),但都不是基于真实地形的统计特性[8]. 例如在基线估计中,通常假设地球是平的,但是实际测量中,干涉 SAR 系统的最优基线是随着地形坡度的变化而改变的,所以基线的估计也有赖于成像区域地形的变化. 另外,在相位解缠

中,主要是基于缠绕相位估计缠绕相位的相位梯度. 现有的相位解缠算法都是基于这样一个假设:可以推导出缠绕相位的离散偏导数,即临近像元的相位差,并且这些相位差的绝对值都小于 π. 通过离散的偏导数可以重建解缠相位. 在理想状态下,干涉相位呈现周期性变化(如图 3 所示高斯体的干涉相位):由 -π 变化到 π 的过程是一个渐变的过程,再由 π 迅速下降到 -π,然后又渐变到 π,反复变化,呈现周期性;变化轮廓分明,层次均匀,突变点为相位周期分界点. 因此,在理想情况下能够提取出方位向和距离向的相位偏导数,然后沿方位向和距离向积分,就达到相位解缠的目的. 但是实际上,星载或机载干涉 SAR 数据普遍存在由于地形起伏较大引起的密集的干涉条纹,由地形起伏引起的雷达阴影(shadow)、透视收缩(foreshortening)、顶底倒置(layover)雷达信号的低信噪比以及各种原因造成的去相干现象等都会造成相位数据的不连续,导致解缠相位的离散相位梯度估计值不能保持一致. 在这些情况下,一些常用假定就不太适用了[8]. 由于真实地面场景在很大程度上具有统计的自相似性,为了逼近真实地形,本文采用自仿射分形技术模拟地面模型.

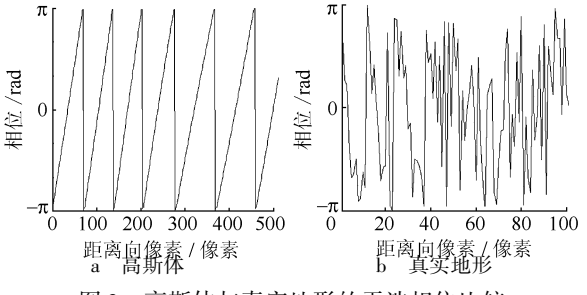


图 3　高斯体与真实地形的干涉相位比较

自仿射分形技术特别适用于分析物体的表面[9]. 所谓物体的表面,小至岩石和金属材料的破裂断面,大至地球表面和海底的地形地貌. 能够产生连续的幂指数频谱的自然现象,将不具有特征频率,而且在很宽的范围内是标度不变的. 利用这些特性,在研究地貌问题时,自仿射分形是很有力的工具. 在分形建模中,随机变量 $\varphi(x)$ 的功率谱 $P_\varphi(k)$ 与波数 k 之间存在着幂指数关系:

$$P_\varphi(k) \propto k^{-\beta} \tag{4}$$

其中谱的指数 β 包含信号平稳度的信息:如果 $\beta<1$,信号就是平稳的,即 $\varphi(x)$ 是平稳变量;如果 $1<\beta<3$,信号是非平稳的,但是增量平稳. 很多地理处理过程都属于后者. 和谱的指数 β 一样,分形维数 D 也是一个重要参数. 谱的指数 β 与分形维数 D 的关系如下:

$$\beta = \begin{cases} 5 - 2D_1 & \text{剖面} \\ 7 - 2D_2 & \text{表面} \end{cases} \tag{5}$$

谱的指数 β 或分形维数 D 是对信号或表面光滑度的测量,分形维数 D 越低(β 越高)表面越光滑. 地形地貌的分形维数近似为 2.3[9],图 4 就是采用自仿射分形方法生成的数字高度图.

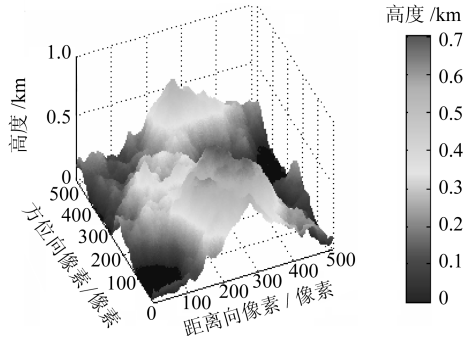


图 4　输入的数字高度模型

3　参数设置

本文采用分形建模对星载干涉 SAR 系统进行计算机仿真实现,仿真参数见表 1[10].

表 1　仿真参数设置

参　数	参数值	参　数	参数值
基线长度/m	150	系统波长/mm	56.6
下视角/(°)	19	基线倾角/(°)	10
天线到第 1 点距离/km	830	方位向分辨率/m	80
距离向分辨率/m	80	方位向像素/像素	512
距离向像素/像素	512	地面模型最大高度/m	700
分形维数	2.3	水域/%	20

4　仿真步骤与结果

将图 4 地面模型作为目标区域,根据干涉仿真相关原理,对整个干涉过程进行了仿真. 具体仿真步骤如下:①输入地面模型(见图 4);②已知天线 1 的位置与系统参数,利用成像几何关系计算出天线 2 的位置;③利用 SAR 卫星与地面目标之间的空间几何参数,计算出各像素点与 2 天线的距离差;④将相位从地形坐标转换到雷达坐标(距离-方位)中,仿真出影像失真效应;⑤计算各点地形坡度,并利用已知参数计算出每点的 γ_b,加入基线去相干干扰;⑥生成干涉图,并消除水平地形效应;⑦相位解缠;⑧相干图. 设定一定百分比的水平面,高度为 0,这样可以提供参考平面. 由于水平面没有任何坡度,所以不能按照公式计算水平面区域的相干系数,水平面区域的相干系数在 0 ~ 0.2 之间随机分布.

将图 4 作为仿真的输入模型. 图 5 是没有加入基线去相干噪声时的干涉条纹图(已经去除了

地形效应). 图6和图7分别为没有去除和已经去除水平地形效应的干涉条纹图,形象显示了由于地形起伏造成的干涉条纹的变化,两图都已经加入了基线去相干噪声. 图8为加入基线去相干后的相位图,由图可见基线去相干噪声对真实相位图的影响. 图9示出了目标各点的相干值.

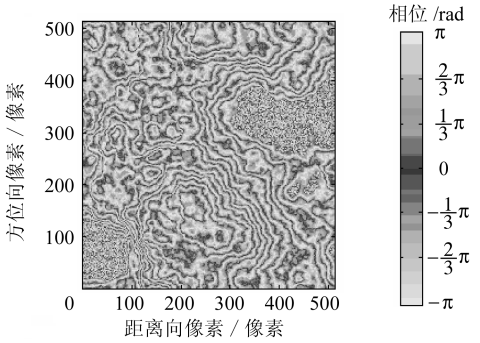


图5 未加入基线去相干噪声时的干涉条纹图(去除地形效应)

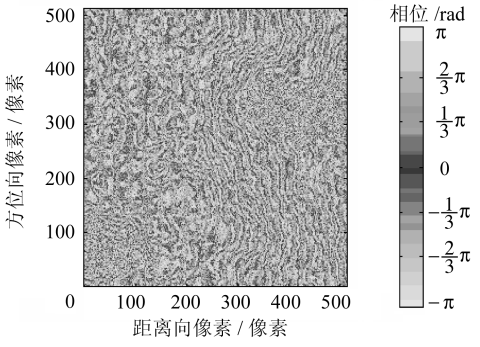


图6 未去除水平地形效应时的干涉条纹图

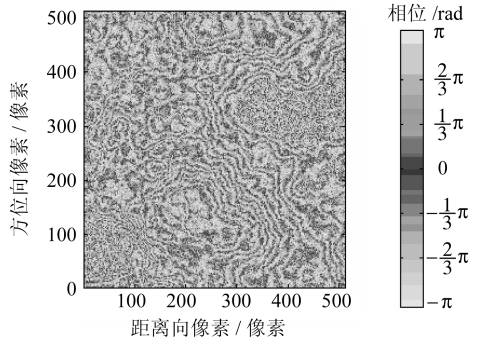


图7 去除了水平地形效应时的干涉条纹图

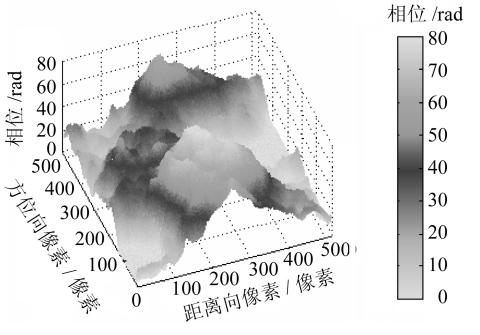


图8 加入基线去相干噪声的相位图

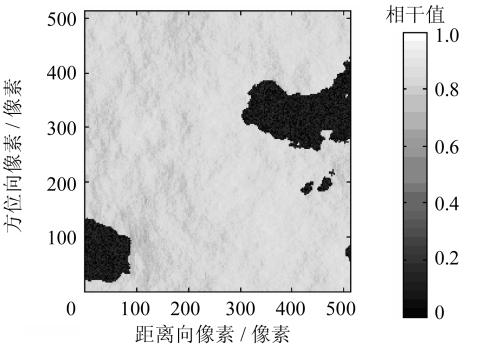


图9 相干图

5 结束语

本文对合成孔径雷达干涉仿真进行了深入研究,通过自仿射分形建立地面模型,很好地仿真了干涉过程,并分析了去相干因素的影响,为系统的优化设计以及后面的干涉研究和算法验证奠定了基础.

参考文献 (References)

[1] Franceschetti G, Lanari R. Synthetic aperture radar processing [M]. Boca roton, Florida: CRC Press, 1999: 167-168

[2] Eineder M. Efficient simulation of SAR interferograms of large areas and of rugged terrain [J]. IEEE Transa Geosci Remote Sens, 2003, 41(6): 1415-1427

[3] Eldhuset K. High resolution spaceborne INSAR simulation with extended scenes [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(2): 53-57

[4] Bamler R, Philipp H. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Inverse Probl, 1998; 14(4): R1-R54

[5] Rosen P A, Hensley S, Joughin Ian R, et al. Synthetic aperture radar interferometry [J]. Proc IEEE, 2000, 88(3): 333-382

[6] Hanssen R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 32-33

[7] Liu Guoxiang. Mapping of earth deformations with satellite SAR interferometry: a study of its accuracy and reliability performance [D]. Hong Kong: Department of Land Surveying & Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, 2003

[8] Guarnieri A M. SAR interferometry and statistical topography [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2002, 40(12): 2567-2581

[9] 陈颙,陈凌. 分形几何学 [M]. 北京:地震出版社,1998
Chen Yu, Chen Ling. Fractal geometry [M]. Beijing: Earthquake Press, 1998 (in Chinese)

[10] 胡庆东. 干涉SAR系统相干性分析与相位展开算法研究 [D]. 北京:北京航空航天大学电子信息工程学院,1998
Hu Qingdong. Study of coherence and unwrapping algorithms in interferometric SAR imageing [D]. Beijing: School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1998 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)