

星载分布式 InSAR 测高性能的 理论及系统仿真评价方法

张永胜, 黄海风, 梁甸农, 朱炬波

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 针对星载分布式干涉合成孔径雷达(InSAR)系统空间几何构形, 全面分析了卫星状态误差、干涉基线误差、干涉相位误差、时间、频率和波束三同步误差以及斜距测量误差等分布式 InSAR 测高误差源, 给出了系统测高误差总的传递关系, 以三大同步误差为重点, 推导了各误差源到高程误差的理论传递模型, 给出了分布式 InSAR 系统的理论评价方法. 基于分布式 InSAR 全过程仿真平台, 提出了一种通过构造一定平均坡度的典型场景和自然场景来进行系统仿真的实验评价新方法. 通过理论和系统仿真实验两种评价方法的结合, 使得分布式 InSAR 系统的性能评价更加全面、真实.

关键词: 合成孔径雷达; 分布式 InSAR; 误差分析; 性能评价; 系统仿真

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)07-1273-06

Theoretic and Simulation Experimental Performance Evaluation Methods of Spaceborne Distributed InSAR System

ZHANG Yong sheng, HUANG Hai feng, LIANG Dian nong, ZHU Ju bo

(College of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: Based on the configuration of spaceborne distributed InSAR system, the height measurement error sources including satellite attitude error, interferometric baseline error, interferometric phase error, time, frequency and beam synchronization error and slant range measurement error are analyzed. The error transfer relationship of distributed InSAR system is presented. Emphasizing on the synchronization error, the error transfer model from all kinds of error sources to height measurement error is deduced. The theoretic performance evaluation method of the distributed InSAR system is presented. Based on the simulating system which containing full process of the distributed InSAR system, a novel system simulation method is proposed by constructing a typical scene or nature scene with determinate average slope. Combining the theoretic and simulation experimental performance evaluation methods, the performance evaluation result of the distributed InSAR system will more comprehensive and believable.

Key words: SAR (synthetic aperture radar); distributed InSAR (interferometric SAR); error analysis; performance evaluation; system simulation

1 引言

快速、大范围、高精度地获取数字高程模型(DEM)数据一直是干涉合成孔径雷达(InSAR)系统追求的目标. 传统地基双航过 InSAR 由于受重访周期长、时间去相关严重等因素的限制, 难以获得令人满意的测高精度^[1]. 随着微小型航天器技术及卫星编队技术的迅速发展, 基于编队卫星的分布式 InSAR 系统利用卫星间的柔性基线进行干涉测量, 使得基线长度脱离了卫星平台的限制, 可通过合理的编队构形设计得到所需的最优基线, 且几乎不存在时间去相关, 能够取得更高的测高精度^[2~8].

分布式 InSAR 系统的测高误差分析及性能评价是系统设计的重要环节. 目前国际上对 DEM 产品通用的评价标准为 DTED(Digital Terrain Elevation Data)标准^[9], 对已有 InSAR 系统(如 SRIM 系统)的测高性能评价, 是将系统获得的测高数据与已知测试点的高精度数据进行比较而得到. 但目前国内外对星载分布式 InSAR 系统仍处于概念研究和系统设计阶段, 无实际数据可用, 只能通过理论推导和仿真实验来评价其性能. 而且, 分布式 InSAR 系统要考虑空间立体测高几何、时间、频率和波束“三大同步”误差以及星间基线测量等新特点, 与传统 InSAR 相比, 存在着更多的测高误差源, 其性能评价方法也更为复杂.

文献[4~7]分别对国际上目前在研的典型分布式 InSAR 系统的预期测高性能给出了初步理论评价,但分析时都借用传统 InSAR 的平面几何结构.文献[10~12]针对分布式 InSAR 的三维几何构形推导了系统相关性 及测高精度.但未考虑“三大同步”等重要误差源.本文在已有文献的基础上,以分布式 InSAR 特有的时间、频率和波束“三大同步”误差为重点,全面分析了星载分布式 InSAR 系统的各种误差源对干涉测高性能的影响.给出了各种误差源与高程误差间的传递关系和测高性能的理论评价方法.并基于分布式 InSAR 全过程仿真平台,提出了一种通过构造 DTED 标准所要求的一定平均坡度的典型场景和自然场景来进行系统仿真的实验评价新方法.通过理论和系统仿真实验两种评价方法的结合,使得系统的性能评价更加全面和真实.

2 分布式 InSAR 测高性能的理论评价方法

2.1 分布式 InSAR 系统测高误差传递定性分析

我们以一发两收的双星编队分布式 Ir-SAR 为例, 其几何构形如图 1 所示, 主星 S_1 既发又收, 辅星 S_2 只接收, 图中坐标系为卫星 S_1 的轨道坐标系^[11], S_1 、 S_2 间的基线长度为 B , 基线方位角和高低角分别为 α 和 β , 卫星 S_1 到地心的距离为 H_0 , 卫星 S_1 和 S_2 到测

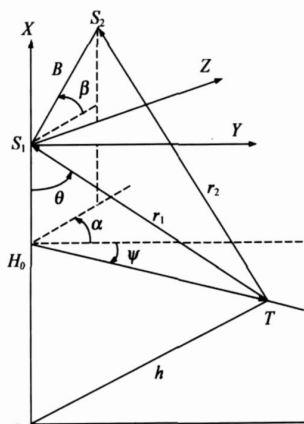


图 1 星载分布式 InSAR 几何构形

绘带内同一散射点 T 的斜距分别为 r_1 和 r_2 . 主星雷达下视角为 θ , 主星的距离-高度平面与轨道面之间的二面角为 ψ , 目标 T 的绝对高程 h 为待求量.

根据图 1 的测高几何关系, S_2 点的坐标为 $(B \sin \beta \cos \alpha, B \cos \beta \cos \alpha, B \cos \beta \sin \alpha)$, 散射点 T 的坐标为

$(-r_1 \cos \theta, r_1 \sin \theta \cos \phi,$
 $-r_1 \sin \theta \sin \phi)$, 由于干涉相位
 方程 $r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \varphi$ ($\Delta \varphi$ 为
 干涉相位, λ 为波长) 可
 得^[11]:

$$(B \sin \beta + r_1 \cos \theta)^2 + (B \cos \beta \cos \alpha - r_1 \sin \theta \cos \phi)^2$$

$$+ (B \cos \beta \sin \alpha + r_1 \sin \theta \sin \phi)^2 = \left(r_1 + \frac{\lambda}{2\pi \Delta \varphi} \right)^2 \quad (1)$$

根据余弦定理有:

$$h = \sqrt{H_0^2 + r_1^2 - 2H_0r_1\cos\theta} \quad (2)$$

联立方程(1)(2), h 可由 H_0 、 B 、 α 、 β 、 ϕ 、 r_1 及 $\Delta\phi$ 这 7 个量计算得到。因此, 分析分布式 InSAR 系统高程误差传递关系时, 我们将这七个量的误差作为基本误差源, 并对导致七个量误差的其他误差源进行详细分解, 得到完整的误差传递关系如图 2 所示。为了便于分析, 图中把基线的长度误差(B 的误差)和姿态误差(α 和 β 的误差)一并考虑为干涉基线误差。

图 2 中各误差传递关系说明如下:

(1)主星高度误差:主星高度 H_0 的误差主要由主星的状态误差导致:

(2)二面角误差:成像时取定多普勒频率后,卫星的速度误差将导致二面角误差,进而传递到高程测量误差:

(3) 干涉基线误差: 干涉基线误差分为两部分: 一部分为实时基线测量误差, 该误差主要由主辅星间相对状态测量误差导致; 另一部分是由测量基线到干涉基线的转换误差。

(4) 绝对相位误差: 绝对相位误差可以分为初始相位误差和解缠相位误差. InSAR 处理中的初始相位是通过地面控制点求得的, 所以控制点误差将引入初始相位误差. 解缠相位误差则与时间和频率同步误差、信号去相关以及处理中所用的视数有关.

(5)斜距测量误差: 高程反演时用到的是主星的斜距, 斜距误差主要由雷达定时误差以及电波通过大气及电离层延时等因素造成。

2.2 分布式 InSAR 系统测高误差传递定量分析

下面给出上述各种误差源到测高误差的定量传递关系. 由于篇幅的限制, 在分析中, 对于一些现有文献中

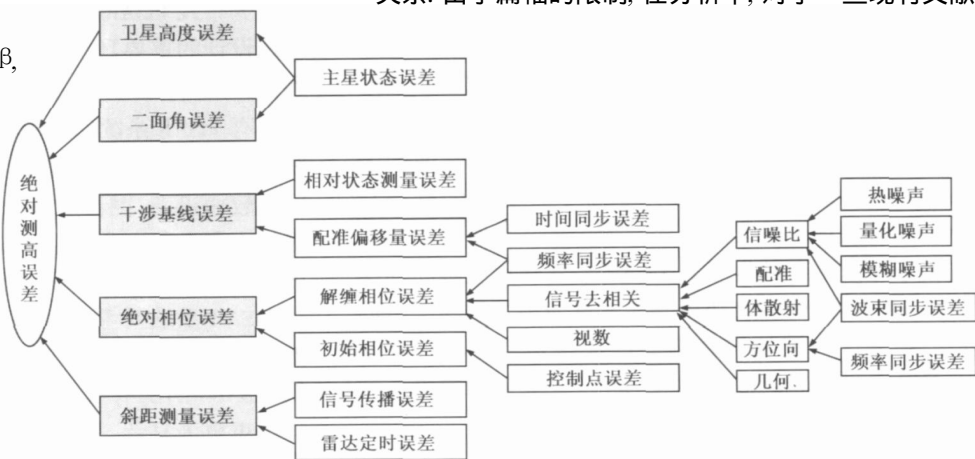


图 2 分布式 InSAR 绝对高程误差传递关系图

已分析过的误差传递关系将不再赘述, 本文着重分析由于分布式 InSAR 所特有的“三大同步”误差对测高性能的影响。而对于基线测量误差这一重要误差源的传递关系请参见文献[14]。

2.2.1 绝对测高误差与七个量误差的传递关系

由式(1)和(2), 用高程对以上分析的七个误差源分别求偏导数就可得到七个误差量与绝对高程误差的传递关系, 推导结果请参考文献[11]。

2.2.2 同步误差导致的配准偏移量误差

在星载分布式 InSAR 中, 时间和频率同步误差将导致目标的位置偏移^[13]。以主图像为基准进行配准处理后, 将产生配准偏移量误差, 从而导致基线测量值到干涉基线的转换误差。由线性时间同步误差 kt 及固定频率同步误差 Δf 导致的方位向配准偏移量误差为^[13]:

$$\Delta x = \frac{|f_T k| + |\Delta f|}{f_r \cdot PRT} \quad (3)$$

其中 $k = \Delta PRT / PRT$ 为线性时间同步误差的系数, f_T 为发射信号的载频, f_r 为多普勒调频斜率, PRT 为方位向采样间隔。求得了配准偏移量误差, 即可得到由此导致的测量基线到干涉基线的转换误差。

$$G_{loss} = \frac{\int_{-\theta/2}^{\theta/2} \left[\frac{\sin(\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi))}{\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta))}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi - \Delta\theta)} \right]^2 \left[\frac{\sin(\pi(W_r/\lambda)\sin(\Delta\alpha))}{\pi(W_r/\lambda)\sin(\Delta\alpha)} \right]^2 d\varphi}{\int_{-\theta/2}^{\theta/2} \left[\frac{\sin(\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi))}{\pi(L_t/\lambda)\sin(\varphi)} \right]^2 \cdot \left[\frac{\sin(\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi))}{\pi(L_r/\lambda)\sin(\varphi)} \right]^2 d\varphi} \quad (5)$$

其中, θ 为发射天线方位向波束主瓣宽度, L 为天线方位向孔径, W 为距离向孔径, λ 为波长, φ 为方位向离轴角。下标 t 和 r 分别表示发射和接收天线。求得了波束同步导致的图像信噪比损失, 就可计算得到由此信噪比损失导致的去相关。

②三大同步误差引起的方位向去相关

频率和波束同步误差都将引起信号方位向(多普勒)去相关。对于波束同步误差, 假设主星和辅星的斜视角(天线电轴与卫星速度方向的夹角)分别为 A_t 和 A_r , 辅星天线指向相对于主星天线存在指向偏差 ΔA 。则有无波束同步误差时辅星 S_2 的双站多普勒中心频率之差为:

$$\Delta f_{DS_2} = \left[\frac{v_a}{\lambda} \cos A_r - \frac{v_a}{\lambda} \cos(A_r + \Delta A) \right] \quad (6)$$

其中 v_a 为平台速度。

根据前面分析结果, 频率同步误差将产生随场景

$$\sigma_h = \sqrt{\left(\frac{\partial h}{\partial H_0} \sigma_{H_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial r_1} \sigma_{r_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \Delta \varphi} \sigma_{\Delta \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial B} \sigma_B \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \beta} \sigma_\beta \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \phi} \sigma_\phi \right)^2} \quad (8)$$

式中的各 σ 代表其下标量的误差均方值, 该值由前文中给出的各种传递关系得出。

相对测高精度主要由在图像中各像素点上随机变化的相位误差 $\Delta \varphi$ 决定, 则分布式 InSAR 的相对测高误差为:

$$\sigma_{\Delta h} = \frac{\partial h}{\partial \Delta \varphi} \sigma_{\Delta \varphi} \quad (9)$$

2.2.3 干涉相位误差分析

(1) 频率同步误差导致的相位误差

频率同步误差使得辅图像成像后产生剩余相位误差, 进而引起干涉相位误差^[15, 16]:

$$\phi_e = 2\pi \Delta f t \quad (4)$$

其中 t 为场景方位向时间。而随机时间和频率同步误差对干涉相位的影响分析较为复杂, 文献[15]和[16]分别用实验的方法得到了零均值标准正态分布的时间和频率同步误差导致的随机干涉相位误差。

(2) 信号去相关导致的相位误差

下面着重分析时间、频率和波束三大同步误差对相关系数的影响。其他去相关因素的分析请参阅相关文献。

①波束同步误差引起的信噪比去相关

波束同步误差将影响天线方向图, 降低回波信号信噪比, 将主星的波束指向作为基准(认为主星波束指向无偏差), 假设辅星天线未与主星天线指向保持同步, 则分布式 InSAR 系统的有效天线方向图为收发天线方向图的叠加。假设辅星天线存在方位向指向偏差 $\Delta \theta$ 和距离向指向偏差 $\Delta \alpha$ 时, 对于主星测绘带中心的某点, 成像后的双站信噪比损失为:

方位向慢时间积累的相位误差, 此相位误差实际上相当于多普勒中心频率误差, 会引起方位向去相关。综合考虑频率和波束同步误差导致的方位向相关系数为:

$$\gamma_\alpha = 1 - \frac{\Delta f_{DS_2} + 2|\Delta f|}{B_d} \quad (7)$$

其中 B_d 为系统的多普勒带宽。

2.2.4 其他误差源

由主星位置和速度导致的卫星高度和多普勒误差以及由于信号传播和定时误差导致的斜距误差与单星雷达的情形相同, 在文献[17]中有详细讨论, 这里不再赘述。由卫星相对状态测量误差到基线误差的传递请参考文献[14]。

2.3 理论测高性能评价

通过以上分析的各种误差源与高程误差的传递关系可以求得分布式 InSAR 绝对测高误差为:

根据式(8)和式(9)中绝对和相对测高精度的理论表达式, 结合前面对各种误差传递关系的定量分析, 可以得到分布式 InSAR 系统测高性能的理论评价结果。

3 分布式 InSAR 测高性能的系统仿真实验评价方法

目前的公开文献中都只给出分布式 InSAR 概念系统性能的理论评价结果,为了得到与实际测高性能更为接近的性能评价,弥补测高误差理论评价的不足,我们建立了分布式 InSAR 全过程仿真系统^[18],并在不同仿真环节处可分别注入卫星姿态误差、三大同步误差、状态测量误差等误差因素。系统仿真的流程以及主要误差的注入节点如图 3 所示。

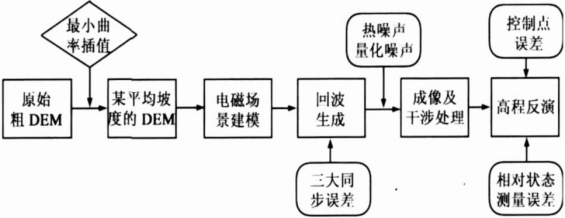


图 3 系统仿真主体流程

目前国际上对 DEM 产品通用的评价标准为美国国家图像地图局提出的 DTED 标准,世界各国在研的 InSAR 系统性能都采用该标准来评价。比如德国空间中心的“Tandem-X”系统的预期测高精度要达到 DTED-3 标准^[7],DTED-3 标准要求在 12 米×12 米的地面网格下,绝对测高精度小于 10 米(90% 置信区间),对于相对测高精度,不同的地形坡度有不同的指标要求:平均坡度小于 20% (对应坡度角 11.3 度)的地形,要求优于 2 米,平均坡度大于 20% 的地形,要求优于 4 米。注意,这里的坡度计算值是与 DEM 网格大小对应的^[19]。

在构建好仿真系统后,仿真实验评价方法的关键是构造满足 DTED-3 标准坡度要求的场景,我们构造了三个层次的场景:首先是构造具有一定坡度的斜坡场景,其坡度方向与雷达视线具有特定的关系,但这不能反映地形坡度的一般性。为此,第二步构造一定坡度的圆锥场景,它能够反映雷达视线和坡度方向的所有情况。这两种典型场景都是理想场景,为反映实际自然场景坡度的多样性,最后构造满足一定平均坡度的自然场景,可以通过对实测粗 DEM 数据进行插值来实现。目前进行 SAR 地面场景仿真时通常是直接采用分形插值方法产生精细网格的 DEM 数据^[20]。但分形插值后的 DEM 数据坡度较之原 DEM 坡度变化剧烈得多,无法控制平均坡度的大小。为了使得实验评估条件与 DTED-3 的标准一致,我们在对粗 DEM 数据插值时首先采用最小曲率的插值方法^[21],将 DEM 加密到 12 米×12 米(DTED-3 标准要求的地面网格大小),该插值方法可以

根据需要,通过调整 DEM 高程得到不同平均坡度的 DEM 数据。之后为反映自然地貌的分形特征,再进行分形插值得到小面单元尺寸的精细 DEM。

通过构造大量满足坡度要求的典型场景和自然场景进行分布式 InSAR 全过程的蒙特卡罗仿真,将仿真结果与 DTED 标准比较最终完成干涉系统测高性能的仿真实验评价。

4 仿真实例

根据以上给出的分布式 InSAR 理论和系统仿真两种测高性能评价方法,我们对 X 波段一发两收双星编队系统进行了性能评价,主星既发又收、辅星只接收,卫星高度 600 公里,在轨道初始时刻的切航迹有效基线约为 200 米。系统的雷达参数及仿真中的主要误差量分别如表 1 和表 2 所示。我们设计了满足双站收发时序的下视角范围为 15°~46° 的 18 个波位,理论分析了考虑图 2 中所有误差时各波位的测高性能,场景坡度取 20%,体散射植被高度 5 米,系统接收机噪声系数取 3dB,系统损耗 3dB,目标的归一化散射系数取-10dB。根据理论评价方法得到系统的绝对和相对测高性能如图 4 和图 5 所示。

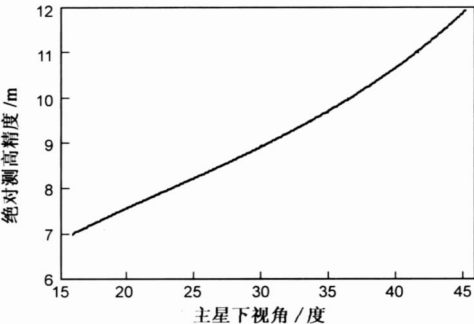


图 4 各波位绝对测高精度的理论评价结果

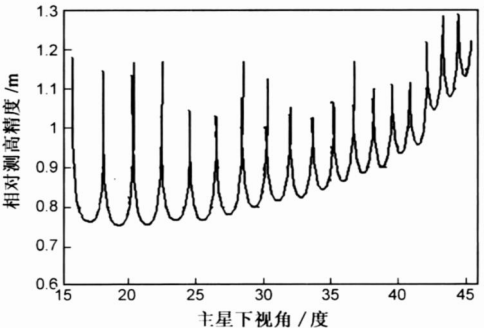


图 5 各波位相对测高精度的理论评价结果

表 1 分布式 InSAR 系统的雷达参数

参数	波长	带宽	PRF	下视角	脉宽	功率	主星天线	辅星天线	地面网格	数据压缩
数值	3.1cm	100MHz	2.9~3.8KHz	15°~46°	30μs	3kW	5m×1m	5m×1m	12m×12m	8 3BAQ

表 2 仿真中的主要误差量

误差源	H_0	r_1	B	α	β	ψ	固定频率	线性时间	频率源短稳	波束指向	配准
数值	1m	1m	1cm	2角秒	2角秒	2角秒	10Hz	1×10^{-9}	1×10^{-11}	0.1°	0.1 像素

对该分布式 InSAR 测高性能进行理论评价后, 我们利用分布式并行仿真平台, 分别针对前面提到的斜坡、圆锥以及一定平均坡度的自然场景进行了系统仿真实验, 系统仿真时采用主星的中心波位, 波束中心下视角

33°, 系统的其他参数和误差量与理论评价时相同, 对经最小曲率插值的、平均坡度为 20% 的自然场景的系统仿真结果如图 6(a)~ 图 6(h) 所示. 实验得到的不同场景下系统相对和绝对测高性能如表 3 所示.

表 3 测高性能的系统仿真评价结果

测高性能 场景类型	无控制点		有控制点	
	绝对测高精度(米)	相对测高精度(米)	绝对测高精度(米)	相对测高精度(米)
斜坡(坡度 20%)	8.081	0.4132	1.97188	0.4205
斜坡(坡度 40%)	13.808	0.4601	2.79309	0.4314
圆锥(坡度 20%)	17.459	2.0089	1.2565	0.2392
圆锥(坡度 40%)	21.011	5.0575	2.46617	0.4343
自然场景(平均坡度 20%)	19.229	2.7662	1.57792	0.380
自然场景(平均坡度 40%)	23.847	5.5376	2.85972	0.5065

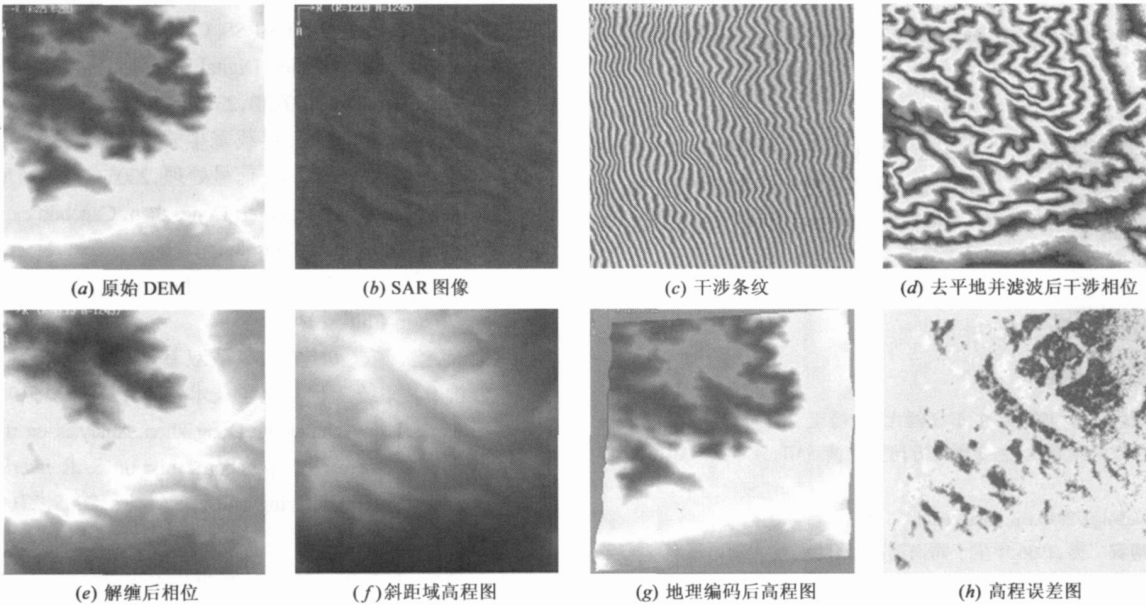


图 6 分布式 InSAR 系统仿真结果

根据上述理论和系统仿真两种性能评价的结果, 得到以下结论:

- (1) 由理论评价结果(图 4 和图 5)可知, 随着下视角增大, 测高精度变差.
- (2) 由系统仿真实验结果(图 6 和表 3)可知, 随着坡度的增大, 无论是典型几何场景还是复杂自然场景, 测高精度都变差; 同一坡度, 随着场景复杂度增加, 测高精度变差; 利用控制点可以校正系统误差, 大大提高绝对测高精度, 而且控制点可以校正场景的偏移, 所以可以适当提高相对测高精度.
- (3) 以 20% 坡度时的情形为例, 理论评价结果比固

定斜坡场景的系统仿真结果精度低, 而比圆锥和自然场景等复杂坡度的系统仿真结果精度高. 这是因为: 一方面理论评价方法没有考虑实际处理中某些环节具有提高测高性能的潜力, 例如通过对相位图的滤波处理可以滤除随机噪声的影响, 因此对于单一坡度的简单场景, 理论分析结果会比实际处理结果差. 另一方面理论分析采用的模型比较理想, 误差因素比较独立和单一, 考虑坡度影响时, 只能针对固定坡度的情况, 不能反映场景多样的坡度特征, 因此对圆锥和复杂自然场景, 理论分析的测高性能会比实际处理结果理想.

- (4) 对于该星载分布式 InSAR 系统, 理论评价结果

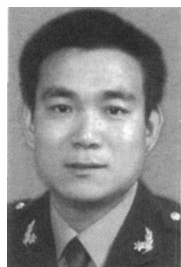
基本满足 DTED-3 标准, 系统仿真评价结果在有控制点时可满足 DTED-3 标准, 在无控制点的情况, 测高精度(尤其是绝对测高精度)比 DTED-3 标准要差。主要原因是在仿真中考虑我国现有技术水平, 星间基线测量误差取为厘米级, 而 Tandem X 系统的基线测量精度为 1-2 毫米。

从以上几点结论可以看出, 单一的理论评价方法不足以全面描述系统的真实性能, 而通过与系统仿真评价结果的结合, 可得到更全面真实的系统测高性能评价。

5 结束语

性能评价是分布式 InSAR 系统设计中的重要环节, 现有的理论评价模型对分布式 InSAR 高程测量的误差源考虑不够全面, 本文给出了全面考虑各种误差源的测高误差传递关系, 对分布式 InSAR 的测高性能进行了较全面的理论评价, 但单纯的理论评价有其局限性, 本文基于分布式 InSAR 全过程仿真系统, 提出了一种新的系统仿真实验评价方法, 通过理论和系统仿真评价方法的结合, 可以得到更加全面、真实的性能评价结果。

作者简介:



张永胜 男, 1977 年生于内蒙古卓资县, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 主要研究方向为星载分布式 InSAR 系统性能分析与三同步技术。

E-mail: zyscn@163.com

黄海风 男, 1976 年生于江西弋阳, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院副教授, 主要研究方向为干涉 SAR、分布式 SAR 系统理论。

E-mail: haifeng0728@vip.sina.com

梁甸农 男, 1936 年生于湖南涟源, 国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究方向为超宽带雷达系统理论、星载分布式 SAR 系统理论及自适应信号处理、谱估计等。

朱炬波 男, 1967 年生于湖南双峰, 国防科技大学理学院教授, 博士生导师, 研究方向为: 信息获取与处理、雷达系统、数学与系统科学等。

参考文献:

[1] 黄海风. 分布式星载 SAR 干涉测高系统技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科技大学, 2005. 10.

Huang Haifeng. Study on System Technique of Distributed Spaceborne Interferometric SAR [D]. Changsha, Hunan: National University of Defense Technology, 2005. 10. (in Chinese)

- [2] M Martin, P Klupar, S Kilberg, J Winter. Techsat 21 and Revolutionizing Space Missions using Microsatellites [A]. 15th American Institute for Aeronautics and Astronautics Conference on small satellites[C]. Utah, USA, 2001.
- [3] D Massonnet. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel[J]. IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 2001, 39(3): 506-520.
- [4] Krieger G, et al. Comparison of The Interferometric Performance for Spaceborne Parasitic SAR Configurations[A]. EU-SAR[C]. Cologne, Germany, 2002. 467-471.
- [5] Mitemayer J, Krieger G, Moreira A, et al. Interferometric Performance Estimation for the Interferometric Cartwheel in Combination with a Transmitting SAR Satellite[A]. IGARSS[C]. 2001. 2955-2957.
- [6] R Caves, A Luscombe, P Lee, K James. Topographic performance evaluation of the RADARSAT 2/3 tandem mission [A]. IGARSS[C]. 2002. 961-963.
- [7] G Krieger, H Fiedler, I Hajnsek, et al. TanDEM-X: Mission Concept and performance Analysis[A]. IGARSS[C] 2005.
- [8] M Zink, H Fiedler, I Hajnsek, G Krieger, et al. The TanDEM-X Mission Concept[A]. IGARSS[C] 2006.
- [9] Performance Specification Digital Terrain Elevation Data (DTED)[R]. MIL-PRF-89020B, 23 May 2000.
- [10] 何峰, 梁甸农, 董臻. 星载寄生式 SAR 系统干涉性能与空间分辨能力分析[J]. 信号处理, 2005, 21(6): 570-576. He Feng, Liang Diannong, Dong zhen. Capabilities of interferometry and spatial resolution improvement in spaceborne parasitic SAR system[J]. Signal Processing, 2005, 21(6): 570-576. (in Chinese)
- [11] 何峰, 梁甸农, 刘建平. 星载双基地 SAR 干涉测高误差分析[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1519-1522. He Feng, Liang Diannong, Dong zhen. Analysis on the height measurement error of spaceborne bistatic SAR interferometry [J]. Systems Engineering and Electronics. 2005, 27(9): 1519-1522. (in Chinese)
- [12] 张秋玲, 冯宏川, 王岩飞. 分布式卫星 InSAR 信号的相关性分析[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(1): 70-74. Zhang Qiuling, Feng Hongchuan, Wang Yanfei. Correlation analysis of interferometric SAR signals of distributed satellites [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005, 20(1): 70-74. (in Chinese)
- [13] Zhang Yongsheng, Liang Diannong, Dong Zhen. Analysis of Time and Frequency Synchronization Errors in Spaceborne Parasitic InSAR System[A]. IGARSS[C] 2006.
- [14] 何峰, 黄海风, 梁甸农. 小卫星编队 SAR 干涉测高精度与基线测量关系研究[A]. 小卫星编队飞行空间状态测量技术研讨会论文集[C]. 湖南长沙, 2005.
- [15] 张永胜, 王敏, 梁甸农, 董臻, 黄海风. 星载分布式 InSAR

(下转第 1255 页)

- ings of IEEE Symposium on Security and Privacy [C] p. 241–255, Oakland, May 2004.
- [8] 何永忠, 冯登国, 一个组播源认证方案的安全分析, 计算机工程, 2006, 10 He Y. Z., Feng D. G., Security Analysis on A Multicast Source Authentication Scheme [J], Computer Engineering, 2006, 10.
- [9] Desmedt Y., and Jakimoski G., Non-degrading Erasure Tolerant Information Authentication with an Application to Multicast Stream Authentication over Lossy Channels [A], Topics in Cryptology [C], CT RSA 2007, LNCS 4377, 2006
- [10] Goldwasser, Micali, Rivest. A digital signature scheme secure against adaptive chosen message attacks [J]. SIAM Journal of computing, 1988, 4, 17(2): 281–308.
- [11] Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables [J]. J. Amer. Statist. Assoc., 1963; 50: 13–30
- [12] Bellare M., Rogaway P., Random oracles are practical: a paradigm for Designing efficient protocols [A]. In 1st Conference on Computer and Communications Security [C], ACM, 1992. 62–73.

作者简介:



何永忠 男, 1969 年出生于重庆, 博士, 北京交通大学计算机学院讲师, 研究方向: 信息安全.

E-mail: yzhhe@bjtu.edu.cn

(上接第 1278 页)

- 系统频率同步误差分析 [J]. 信号处理, 2007, 23(6): 927–931.
- Zhang Yongsheng, Wang Min, Liang Diannong, Dong Zhen, Huang Haifeng. Analysis of frequency synchronization error in spaceborne parasitic interferometric SAR system [J]. Signal Processing, 2007, 23(6): 927–931. (in Chinese)
- [16] 张永胜, 梁甸农, 孙造宇, 董臻. 时间同步误差对星载寄生式 InSAR 系统相位误差的影响分析 [J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 151–155.
- Zhang Yongsheng, Liang Diannong, Sun Zaoyu, Dong Zhen. Effect of time synchronization error on interferometric phase of spaceborne parasitic InSAR system [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(2): 151–155. (in Chinese)
- [17] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论 [M]. 国防工业出版社, 北京, 2003.
- Yuan Xiaokang. Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar [M], Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [18] 路兴强, 余安喜, 王敏, 梁甸农. 小卫星分布式雷达仿真系统的集群技术实现 [J]. 现代雷达, 2006(8): 1–3.
- Lu Xingqiang, Yu Anxi, Wang min, Liang Diannong. A simulation system for distributed spaceborne radar based on PC cluster [J]. Modern Radar, 2006(8): 1–3. (in Chinese)
- [19] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉大学出版社, 武汉, 2003.
- [20] 陈杰, 周荫清, 李春生. 星载 SAR 自然地面场景仿真方法研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1202–1205.
- Chen Jie, Zhou Yinqing, Li Chunsheng. Spaceborne synthetic aperture radar image simulation of natural ground scene [J]. Acta electronica Sinica, 2001, 29(9): 1202–1205. (in Chinese)
- [21] 陈斌. 一种离散化的最小曲率插值方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(1): 49–54.