

地基 SAR 形变监测误差分析与实验

曲世勃^{①②} 王彦平^{*①} 谭维贤^① 洪文^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 地基 SAR (Ground Based Synthetic Aperture Radar, GB-SAR) 是进行区域性、全天时、全天候、定点连续形变监测的重要手段。该文对中国科学院电子学研究所研制的地基 SAR 系统 ASTRO (Advanced Scannable Two-dimensional Rail Observation system) 的形变监测性能进行分析, 结合 ASTRO 系统成像几何给出了其形变监测模型和精度分析模型, 着重分析了影响形变监测精度的主要误差源。最后以 ASTRO 系统为实验平台开展了形变监测实验与分析, 验证了 ASTRO 系统用于形变监测的能力。

关键词: 地基合成孔径雷达; 形变监测模型; 形变监测精度分析模型; 形变监测误差分析

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0001-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00250

Deformation Detection Error Analysis and Experiment Using Ground Based SAR

Qu Shi-bo^{①②} Wang Yan-ping^① Tan Wei-xian^① Hong Wen^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Ground Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) is an effective tool for regional deformation detection, it has the ability of continuous monitoring for a certain area day and night regardless of the weather condition. ASTRO (Advanced Scannable Two-dimensional Rail Observation system) is a GB-SAR system constructed by Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences (IECAS). In order to make out the deformation detection performance of ASTRO, GB-SAR imaging geometry is presented, the deformation detection model and the analysis of error sources are derived in this paper. The deformation detection error sources are analyzed using precise deformation geometry. Finally, a deformation detection experiment is carried out using ASTRO, and the results demonstrate the ability of deformation detection.

Key words: Ground Based SAR; Deformation monitoring model; Deformation monitoring precision model; Deformation monitoring error analysis

1 引言

形变监测是滑坡、沉降、地震等灾害监测的重要支撑手段, 其研究已成为近几年遥感领域里的重要研究内容, 欧洲空间局主办的Fringe会议以及2010年香港中文大学主办的大型线状人工地物形变监测会议都是针对形变监测举办的专题会议。根据形变监测的工作模式和测量特点可以将其分为两类: 一类是以单点测量为基础, 再将单点的测量结果经过平差计算估计整个区域的形变, 包括倾斜仪

或斜度仪、应变测量计、同轴电缆电磁波测量、光纤传感测量、GPS测量等, 该类技术也是目前应用较为广泛的形变监测手段。另外一类是以连续平面测量为特点, 不仅能获取监测目标的形变量而且也可以得到其形变趋势和总体形变特征, 干涉SAR技术是此类形变监测技术的一个典型代表, 其测量精度和安全性优于单点测量的形变监测技术。

干涉SAR可以提供远距离、大范围、连续空间覆盖的形变监测结果, 有利于对灾害形变的性质、范围、灾害程度进行准确判断, 广泛适用于火山监测、地表下陷、山体滑坡和地震形变监测等方面。目前用于形变监测的干涉SAR数据大多来源于现有的星载SAR系统, 如ERS, Envisat, ALOS, Radarsat

2010-03-18 收到, 2010-07-12 改回

国家自然科学基金重大项目(60890070)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助课题

*通信作者: 王彦平 ypwang@mail.ie.ac.cn

等,采用重轨干涉技术实现对地表形变的监测。由于星载SAR系统重访时间长,难以实现对形变区域的定点连续监测。

地基SAR(GB-SAR, Ground Based Synthetic Aperture Radar)通过天线在水平平直轨道上运动形成方位向合成孔径获取SAR数据,通过在不同时间点对目标区域的重复观测获取时间序列干涉数据用于形变监测,可达到精度为毫米级的形变监测结果,是对局部区域形变监测的一种技术手段。地基SAR系统具有区域性、全天时、全天候、定点、连续监测的优点,方便携带、安装灵活等优点,其非接触的测量方式可以在安全距离内获取被监测危险区域的形变数据,同时采集所得信息为区域性大面积的形变信息比单点的形变信息更有助于灾害的理解和预测。地基SAR的这些优点使其成为了机载/星载SAR形变监测的有效补充手段。

国外多家研究机构开展了有关地基SAR系统的研究,包括意大利的Joint Research Centre^[1]和佛罗伦萨大学(University of Florence)^[2],西班牙的Technical University of Catalonia^[3],英国的Sheffield大学^[4]。在地基SAR的应用方面,已经开展了有关滑坡监测^[5]、冰川区域监测^[6]、雪崩山体识别^[7]等监测项目。中国科学院电子学研究所微波成像国家级重点实验室结合先进体制SAR实验验证需求研制了地基SAR系统ASTRO(Advanced Scannable Two-dimensional Rail Observation system),ASTRO系统具备2维扫描、多维孔径合成、多发多收、多极化工作模式,可用于多基线SAR层析、3维SAR成像、MIMO SAR等先进体制SAR的实验研究^[8]。

本文对中国科学院电子学研究所研制的地基SAR系统ASTRO的形变监测性能进行分析。结合ASTRO系统成像几何给出了其形变监测模型和精度分析模型,着重分析了影响形变监测精度的主要误差源。导出了形变监测系统工作参量与形变监测结果的关系,并结合系统工作参数对形变监测误差进行定量分析。最后采用ASTRO系统为地基SAR形变监测实验平台,通过形变监测实验验证了系统的形变监测能力。

2 地基SAR系统形变监测模型

地基SAR通过控制天线沿直线轨道运动实现了对局部观测区域的2维分辨成像,其基本成像几何关系如图1所示^[9-11]。地基SAR轨道方向设为 y 方向,轨道长为 L ,轨道相对观测目标水平高度差为 H ,天线照射俯角为 θ ,观测范围大小为 M 。地基SAR系

统工作中的实际观测场景大小 M 往往是远大于方位向轨道长度 L ,如图1所示,因此进行成像处理时需要沿方位向进行补零。其原则就是保证补零后的方位向信号长度与实际观测区域大小相当,否则会出现方位向图像模糊,进而影响SAR图像质量。由于地基SAR系统设计时主要针对近距离局部观测区域,因此观测距离的变化引起电磁波随距离的衰减不能忽略,严重时还会使图像散焦,需要在地基SAR成像回波信号建模中予以考虑。根据波恩近似考虑了距离衰减,地基SAR回波经成像后的复数据信号模型如式(1)所示^[12-14]。

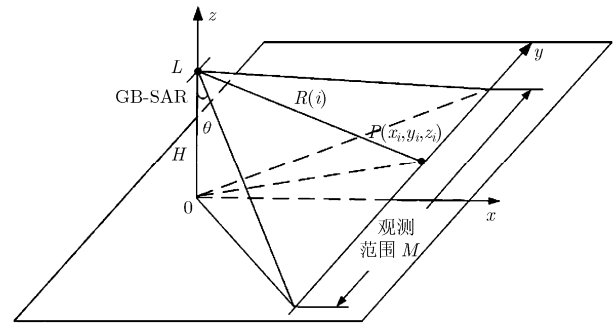


图1 GB-SAR观测点和观测范围的立体几何关系

$$\begin{aligned} S(f, R) &= \sum_i \sigma(x_i, y_i) \times \frac{1}{R(i)} \exp\left\{-j \frac{4\pi f}{c} R(i)\right\} \\ &= \sigma \times \frac{1}{R} \exp\left\{-j \frac{4\pi f}{c} R\right\} \end{aligned} \quad (1)$$

参考零点位置如图1所示, $z_i = 0$, 由几何关系可得 $R(i) = \sqrt{(x_i)^2 + (y - y_i)^2 + H^2}$ 为观测目标 $P(x_i, y_i, z_i)$ 到雷达天线的距离。 $\sigma(x_i, y_i)$ 为观测区域目标复散射系数, 则 $|\sigma(x_i, y_i)|$ 为观测目标的散射强度, $\angle\sigma(x_i, y_i) = \phi_{\text{scatter}}$ 为散射相位, y 为地基SAR方位向采样位置, f 为发射信号的频率, c 为电磁波传播速度。

由式(1)假设干涉处理中先后两次观测的雷达复数据表示为

$$S_1(f_1, R_1) = |\sigma_1| \exp\{\phi_{\text{scatter}1}\} \times \frac{1}{R_1} \exp\left\{-j \frac{4\pi f_1}{c} R_1\right\} \quad (2)$$

$$S_2(f_2, R_2) = |\sigma_2| \exp\{\phi_{\text{scatter}2}\} \times \frac{1}{R_2} \exp\left\{-j \frac{4\pi f_2}{c} R_2\right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_2 S_1^* &= |\sigma_1| \cdot |\sigma_2| \times \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2} \exp\left\{-j \frac{4\pi}{c} (f_2 R_2 - f_1 R_1)\right\} \\ &\quad \cdot \exp\{\phi_{\text{scatter}2} - \phi_{\text{scatter}1}\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 σ_1 , σ_2 为前后两次观测的目标复散射系数, 由目标物的几何形状、质地特性(金属、岩石、沙土等地物目标)以及目标的粗糙度、湿度等特性决定;

$R_1 = \sqrt{x_1^2 + H^2}$, $R_2 = \sqrt{x_2^2 + H^2}$ 是雷达平台到目标的最近斜距; f_1 , f_2 为前后两次观测的系统频率; $\phi_{\text{scatter}2} - \phi_{\text{scatter}1}$ 是目标的后向散射造成的相位差异。

对式(4)取相位即为干涉测量相位, 相位中包含形变前后斜距量、频率差异以及监测目标的散射相位差异, 如式(5)所示。

$$\Delta\phi = -j \frac{4\pi}{c} [f_1(R_2 - R_1) + \Delta f \cdot R_2] + (\phi_{\text{scatter}1} - \phi_{\text{scatter}2}) \quad (5)$$

式中 Δf 为两次测量中的系统频率偏移, $\Delta f = f_2 - f_1$ 。

通常认为干涉测量中的两次观测目标具有较高相关性也即散射特性非常相似, 监测目标的散射相位差异可以忽略。则相位表示为

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{c} [f_1(R_2 - R_1) + \Delta f \cdot R_2] \quad (6)$$

与其相应的形变为视向形变量, 表示为

$$r_{\text{defo}} = R_2 - R_1 = \frac{\Delta\phi \cdot c}{4\pi f_0} - \frac{\Delta f}{f_0} R_2 \quad (7)$$

假设第1幅图像的测量频率 $f_1 = f_0$ 为系统设定频率, 第2幅图像的测量频率相对设定频率具有频率误差 Δf 。因此在不考虑系统频率偏移的情况下式(6)中 $f_1 = f_2 = f_0$, 形变相位关系如式(8)所示, 式(9)为该情况下的形变表达式。

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{c} f_0 \cdot r_{\text{defo}} \quad (8)$$

$$r_{\text{defo}} = \frac{\Delta\phi \cdot c}{4\pi f_0} \quad (9)$$

形变真值是视向形变值通过系统工作几何关系计算出来的。几何关系可以有如下两种假设模型: 平行近似几何关系和精确几何关系。

斜距平行近似假设情况如图2所示, 雷达与监测目标间距离较远, 两次雷达波近似平行。在图中 R_1 , R_2 表示形变前后的斜距长度, r 为形变真值矢量长度, ζ 为形变向量与地面的倾角, θ 为雷达入射角, 为形变视向分量, 为表达简洁, 本文将形变倾角和

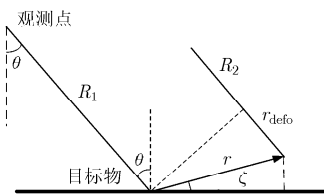


图2 斜距近似平行假设几何关系

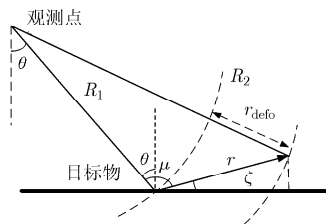


图3 形变向量零基线精确几何关系

雷达波入射角统一为角度 $\mu = \pi/2 - \zeta + \theta$ 。由斜距近似平行假设几何关系可知此时的形变真值的解算为式(10), 形变真值计算与角度 μ 有关。

$$r = \frac{r_{\text{defo}}}{\sin(\theta - \zeta)} = \frac{r_{\text{defo}}}{\cos \mu} \quad (10)$$

$$R_2^2 = (R_1 + r_{\text{defo}})^2 = r^2 + R_1^2 - 2rR_1 \cos \mu \quad (11)$$

$$r = R_1 \cos \mu \pm \sqrt{R_1^2 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}^2 + 2R_1 r_{\text{defo}}} \quad (12)$$

$$r_{\text{error}_P} = R_1 \cos \mu + \sqrt{R_1^2 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}^2 + 2R_1 r_{\text{defo}}} - \frac{r_{\text{defo}}}{\cos \mu} \quad (13)$$

其中 r_{error_P} 为平行近似处理误差。

精确几何关系如图3所示, $R_2 = R_1 + r_{\text{defo}}$ 。利用余弦定理可以得到视向的形变分量与形变真值之间的关系为式(11)所示, 该式是有关形变真值 r 的一元二次方程, 解方程可得形变真值表达为式(12)所示, 形变真值与角度 μ 、斜距 R_1 、干涉相位 φ 有关, 形变真值解算表达式根据角度 μ 的取值范围而相应变化。式(12)中 $\mu \in (0^\circ, 90^\circ)$ 时取负号, $\mu \in (90^\circ, 180^\circ)$ 时取正号, $\mu = 90^\circ$ 时图4中的几何假设关系不成立, 因此式(12)不成立。当形变方向与雷达波入射方向成 90° 时形变并无视向分量, 干涉系统对形变没有监测能力, 本文以下分析采用图4中所示的假设关系 $\mu \in (90^\circ, 180^\circ)$ 。由式(10), 式(12)得斜距平行近似所产生的误差为式(13)所示。图4是假设系统形变量为 0.01 m, $\mu = 110^\circ$ 的时候形变真值近似计算的误差, 可见近似计算误差随斜距长度尤其在 20 m 以内的情况下影响明显, 因此有必要对地基系统采用精确几何模型进行分析, 有关真值解算误差将在下一节中详细讨论。

3 地基 SAR 形变测量误差来源分析

地基 SAR 形变测量有其自身特有的工作模式和系统性能, 因此应用地基 SAR 进行形变监测时具有不同于星载或机载系统的信号分析模型和误差特性, 本节主要定量分析影响地基 SAR 形变监测精度的主要误差来源。由第2节分析可知, 干涉相位可以

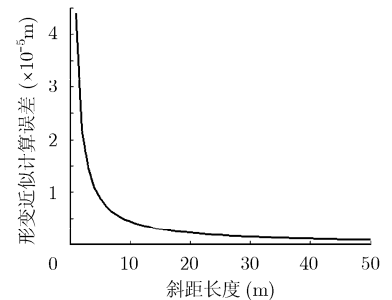


图4 形变真值近似处理偏差

直接计算得出视向形变分量,但对形变场的正确判断通常需要形变真值的求解。形变真值的求解除了需要考虑干涉相位外还需结合系统的工作参数和形变向量几何关系进行解算,因此地基SAR形变测量误差主要由视向形变测量误差和从视向形变解算形变真值过程中产生的形变真值解算误差两部分组成。

3.1 视向形变测量误差

根据式(9),干涉相位误差和系统工作频率偏移是视向形变误差的主要来源。因此,根据式(9),视向形变误差 Δr_{defo} 相应分成两部分,如式(14)所示。

$$\Delta r_{\text{defo}} = \left[\left(\frac{\partial r_{\text{defo}}}{\partial (\Delta \phi_{\text{erro}})} \Delta \phi_{\text{erro}} \right)^2 + \left(\frac{\partial r_{\text{defo}}}{\partial (f_0)} \Delta f_0 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

式中 Δf_0 为频率偏移误差; $\Delta \phi_{\text{error}} = \Delta \phi_{\text{atmo}} + \Delta \phi_{\text{nois}} + \Delta \phi_{\text{scat}}$,表示干涉相位误差 $\Delta \phi_{\text{error}}$ 受到大气干扰相位 $\Delta \phi_{\text{atmo}}$,干涉相位噪声 $\Delta \phi_{\text{nois}}$,散射体去相干相位 $\Delta \phi_{\text{scat}}$ 等因素的影响。

如前所述,通常目标具有较高相关性也即散射特性非常相似,因此监测目标的散射相位差异 $\Delta \phi_{\text{scat}}$ 可以忽略。而干涉相位噪声可以通过滤波等信号处理的方式加以抑制。

大气干扰相位 $\Delta \phi_{\text{atmo}}$ 对监测系统性能影响的研究是近几年的研究热点,国内外已有很多学者就该问题开展了广泛研究^[15,16],永久散射体技术被认为是解决该问题的一个有效途径。对星载SAR系统而言,在长时间的形变监测中大气层的水气和电离层等干扰因素在干涉相位上表现为时间域内的高频信号,可以通过其频域特性将大气干扰和目标的非线性形变信息进行分离并去除。而由于测量时间相对灵活,地基SAR所面临的大气误差与星载系统具有一定差别。若每组测量数据时间间隔较长则大气状态具有较弱相关性,可以利用大量数据集采用永久散射体技术对大气误差进行抑制。但通常地基SAR系统监测数据时间间隔较短,大气状态具有较高的

相关性,因此大气干扰误差的去除应视形变监测的实际情况而定。大气干扰作为形变监测的一项重要误差来源,在以后的工作中应结合具体野外形变监测实验做进一步分析。

下面着重考察视向形变误差的另一个分量,频率偏移误差 Δf_0 。对比式(6)、式(8)频率变化 Δf 所产生的干涉相位变化表达为式(15)。相位误差大小为斜距长度和频率偏移量的函数,图5(a)为干涉相位随频率偏移量变化而产生的误差。由式(7),式(9)得频率偏移所产生的视向形变测量误差式(16), $\alpha = \Delta f / f_0$ 为频率偏移比。可见干涉相位误差与频率绝对偏移量有关,而频率偏移所产生的视向形变测量误差是频率偏移比 α 的函数,其变化曲线如图5(b)所示,频率误差在万分之一以下所产生的等效形变误差为毫米级,并且误差随距离增大而逐渐变大。

$$\Delta \phi_{\text{error}} = \frac{4\pi}{c} \Delta f \cdot R_2 \quad (15)$$

$$r_{\text{error}} = \frac{\Delta f}{f_0} R_2 \quad (16)$$

3.2 形变真值解算误差

由式(12)可看出,形变真值计算取决于视向形变值、斜距长度、角度 μ 等因素,其中视向形变值取决于干涉相位,如3.1节叙述是中心频率和斜距长度的函数。各因素之间相互独立,对形变真值计算所造成的误差影响表示为各部分误差贡献均方和,表示成式(17)的形式。式(18)分别对 R_1 , μ , r_{defo} 求微分得到形变真值对斜距、角度 μ 、视向形变(也可以看作相位误差)的敏感函数,如式(18)-式(20)。图6为斜距误差在形变真值解算中的误差影响,其含义是在各给定系统参数下(斜距长度、角度 μ),假设形变量为1 cm,斜距误差每偏差1 m所产生的等效形变计算误差。可见斜距因素导致的形变误差在 10^{-8} m甚至更小,因此该误差对形变测量结果影响不大。图7为形变误差随角度 μ 变化的关系曲线,在

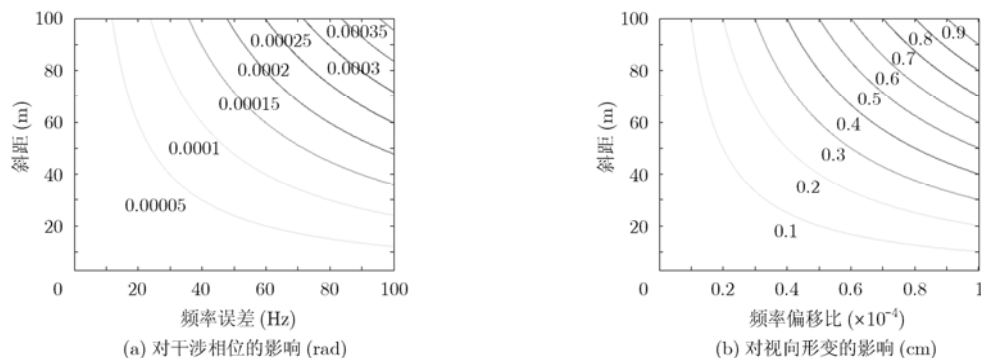


图5 测量频率偏移所产生的相位误差和形变测量误差

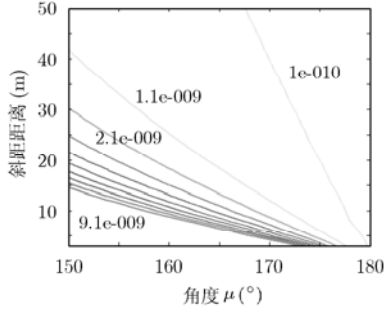


图6 斜距误差对形变真值解算的误差影响

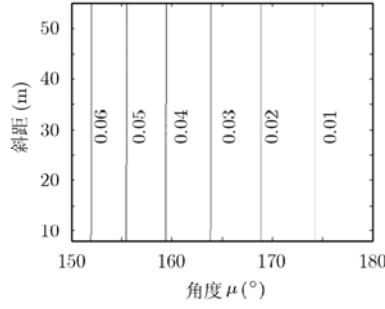


图7 角度 μ 误差对形变真值解算的影响

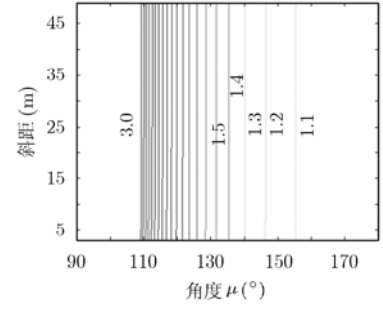


图8 视向形变测量误差对形变真值解算的误差影响

给定系统参数下角度 μ 误差为 1° 时产生毫米级的形变计算误差，该误差随 μ 角增大而逐渐降低，随斜距变化并不明显。图8为视向形变测量误差对形变真值解算的影响。视向形变测量值直接经相位计算而得到，其误差也可以看作是干涉相位的误差。由图8可看出，视向形变的误差随角度 μ 的减小而被放大，随斜距变化不明显。在有些星载形变监测实验中视向形变值被近似看作形变真值处理，但由于地基 SAR 系统灵活多变的工作模式，在实验设计和分析中对该误差应予以考虑。

$$\Delta r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial R_1} \cdot \Delta R_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial r_{\text{defo}}} \cdot \Delta r_{\text{defo}} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial \mu} \cdot \Delta \mu \right)^2 \right]^{1/2} \quad (17)$$

$$\frac{\partial r}{\partial R_1} = \cos \mu + \frac{R_1 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}}{\sqrt{R_1^2 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}^2 + 2R_1 r_{\text{defo}}}} \quad (18)$$

$$\frac{\partial r}{\partial \mu} = -R_1 \sin \mu - \frac{R_1^2 \cos \mu \sin \mu}{\sqrt{R_1^2 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}^2 + 2R_1 r_{\text{defo}}}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial r}{\partial r_{\text{defo}}} = \frac{r_{\text{defo}} + R_1}{\sqrt{R_1^2 \cos^2 \mu + r_{\text{defo}}^2 + 2R_1 r_{\text{defo}}}} \quad (20)$$

4 地基 SAR 形变监测实验

形变监测实验设计主要包括系统参数设计和监测目标设置。系统参数设置应该依据形变监测误差分析，综合考虑各系统因素对形变监测结果的影响，合理设置系统斜距距离、入射角、系统工作频率。由第3节地基 SAR 干涉精度分析可以看出，斜距长度对形变监测结果影响不大，但角度 μ 对形变监测结果影响较明显。据此在本实验中设置形变沿水平方向，雷达入射角设置为 63° ，则角度 μ 为 153° 。本实验的实验平台 ASTRO 系统的天线转角精度可达 0.1° ，由式(19)计算可知形变量为 1 cm 的时候误差 $\Delta \mu < 0.55$ mm，由式(20)计算可知视向形变量误差传递到形变真值解算中放大倍数 $\Delta r_{\text{defo}} < 1.1214$ 倍。由图2可知视向形变误差由系统工作频率稳定性和

斜距距离决定，本实验矢量网络分析仪 Agilent 5230C 的频率偏移比 α 在 10^{-10} 以下^[17]，观测距离为 2~5 m，据3.1节中分析系统频率偏移所产生的视向形变误差 $2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-8}$ cm，系统工作频率偏移所造成的影响在本实验可以忽略。需要说明的是，地基 SAR 在长时间的形变监测实验中或者在执行野外持续形变监测任务的时候，系统微小的频率偏移会随时间逐步积累并不断被放大，因此有必要对系统工作频率进行预测，并根据误差分析模型对其引起的形变测量误差进行估计。

本文以金属目标作为形变监测的对象，实验场景设计如图9所示，包括一个 101 cm 长的金属杆、3 个金属球和 3 个三角反射器。Y 轴方向为地基 SAR 轨道运动方向，X 轴方向为地距方向。雷达平台高 1.65 m，中心频率为 7 GHz，带宽 2 GHz，目标场景斜距范围在 2~5 m，具体的系统参数列于表1中。金属球直径为 10 cm，A 球和 B 球分别向 X 轴的负轴方向和正轴方向移动 1.00 cm，金属杆一端固定另外一端向 X 轴负轴方向移动 1.00 cm。图10，图11分别为雷达幅度图像和地距形变解算值，可看到金属杆从固定端到移动端产生渐进的形变，金属球 A、B 的形变趋势与实际情况吻合，而其他固定不动的目标物在结果中并无形变产生。表2将形变测量结果与实验设置值对比，形变计算结果与实际目标移动距离略有差别。由上述对本实验的系统误差分析可知，本实验系统误差控制在较低的水平，因此由系统所带来的误差对实验结果影响很小，实验结果中的误差可以排除系统误差影响因素。理论上实验结果应与形变量精确吻合，但由于实际金属球和金属杆的移动和测量的方式相对粗劣，目标物的移动精度较差，位移量读取误差等因素会导致测量结果的偏差。因此，综合分析本实验结果，误差主要产生于实验尺度测量仪器和人为因素，总体上看实验结果与实际情况吻合较好。

5 结论

灵活多样的工作模式为地基 SAR 提供了广阔应

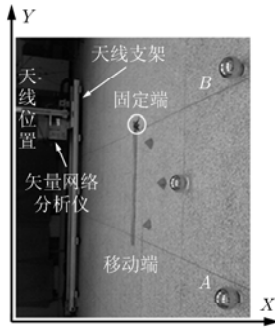


图9 实验目标物设置

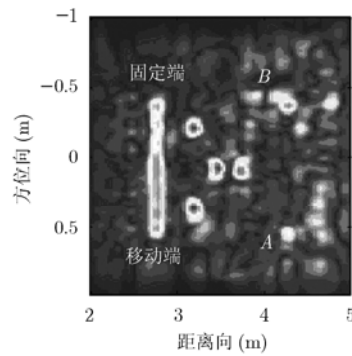


图10 雷达幅度图像

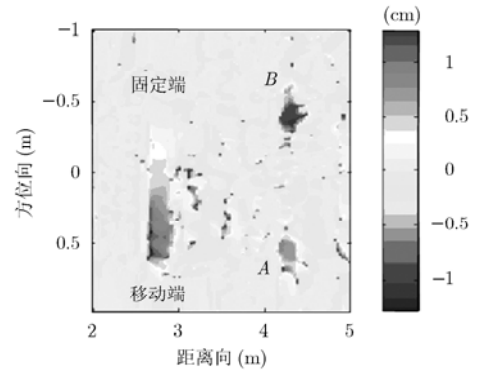


图11 形变计算结果图

表1 地基 SAR 形变监测实验系统参数设置

参数名称	参数设定值
极化方式	VV
载频(GHz)	7.000
带宽 (GHz)	2.000
步进频率 (MHz)	1.250
方位向采样间隔 (m)	0.005
方位向合成孔径长度 (m)	2.000

表2 地基 SAR 形变监测结果与形变真实值对比

	形变真值(cm)	形变测量值(cm)
金属球 A	-1.00	-0.849
金属球 B	1.00	0.991
金属杆	0.00 ~ -1.00	-0.011~ -1.113

用前景的同时,系统工作模式的差异也为形变监测带来了不同的误差来源。为探究地基SAR在形变监测中的系统性能,本文通过对地基SAR成像几何分析和回波信号分析,得出形变测量干涉相位模型,并分析了影响干涉相位模型的影响因素。又通过对形变精确几何关系分析,得出测量中心频率偏移、斜距误差、倾角误差等系统因素对形变测量结果的影响,并对其误差源进行量化分析,为形变监测实验精度分析提供理论模型。最后依据分析结果对本文实验的系统参数进行设置,实验结果分析表明测量结果与形变真实值吻合较好,初步证明了地基SAR形变测量手段的有效性。

地基SAR形变监测的测量时间可控,雷达频率、入射角、观测距离等实验参数均可根据观测场景和形变监测精度要求灵活控制,是滑坡、矿区沉降等形变区域定点、连续、全天候监测的重要手段,是机载、星载SAR大面积形变监测的有效补充形式。

参考文献

- [1] Nico G, Leva D, Guasch J F, Antonello G, and Tarchi D. Generation of digital terrain models with a ground-based SAR System[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(1): 45-49.
- [2] Pieraccini M, Luzi G, and Atzeni C. Terrain mapping by ground-based interferometric radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(10): 2176-2181.
- [3] Aguasca A, Broquetas A, Mallorqui J, and Fàbregas X. A solid state L to X-band flexible ground-based SAR system for continuous monitoring applications[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2004*, Anchorage, Alaska, Sept. 20-24, 2004: 757-760.
- [4] Bennett J C, Morrison K, Race A M, Cookmartin G, and Quegan S. The UK NERC fully portable polarimetric ground-based synthetic aperture radar (GB-SAR)[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2000*, Honolulu, Hawaiian Islands, Jul. 24-28, 2000: 2313-2315.
- [5] Noferini L, Takayama T, Pieraccini M, Mecatti D, Macaluso G, Luzi G, and Atzeni C. Analysis of ground-based SAR data with diverse temporal baselines[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1614-1623.
- [6] Pieraccini M, Noferini L, Mecatti D, Macaluso G, Luzi G, and Atzeni C. Digital elevation models by a GBSAR interferometer for monitoring glaciers: the case study of Belvedere Glacier[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008*, Boston, Massachusetts, USA, Jul. 6-11, 2008: 1061-1064.
- [7] Vazquez A M and Guasch J F. A GB-SAR Processor for Snow Avalanche Identification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3948-3956.
- [8] Hong Wen, Tan Wei-xian, Wang Yan-ping, and Wu Yi-rong. Development and experiments of ground-based SAR in

- IECAS for advanced SAR imaging technique validation[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar 2010, Aachen, Germany, June 7–10, 2010: 931–934.
- [9] Fornaro G, Reale D, and Serafin F. Four-Dimensional SAR imaging for height estimation and monitoring of single and double scatterers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 224–237.
- [10] Watanabe M, Matsumoto M, Shimada M, and Sato M. GB-SAR/PiSAR simultaneous experiment for a trial of flood area detection[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium 2008, Boston, Massachusetts, USA, July 6–11, 2008: 27–30.
- [11] Ferrer P J, Romeu J, González-Arbesú J M, Aguiasca A, Pipia L, López-Martínez C, and Fàbregas X. Transpolarizing trihedral measurement using UPC X-band GB-SAR[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium 2009, Cape Town, South Africa, July 12–17 2009: 586–589.
- [12] 保铮, 刑孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 123–182.
- [13] Qi Yao-long, Tan Wei-xian, Xia Dong-kun, Wang Yan-ping, and Hong Wen. Research on the near range imaging of ground-based SAR system[C]. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Xi'an, China, Oct. 26–30, 2009: 455–458.
- [14] Wang Yan-ping, Tan Wei-xian, Hong Wen, and Wu Yi-rong. Ground-based SAR for man-made structure Deformation monitoring[C]. 1st International Workshop Spatial Information Technologies for Monitoring the Deformation of Large-Scale Man-made Linear Features, Hong Kong, China, Jan. 11–12, 2010: 55–65.
- [15] Li Zhen-hong, Fielding E J, and Cross P. Integration of InSAR time-series analysis and water-vapor correction for mapping postseismic motion after the 2003 Bam (Iran) earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3220–3230.
- [16] Perissin D, Prati C, Rocca F, and Wang Teng. PSInSAR analysis over the Three Gorges Dam and urban areas in China[C]. Urban Remote Sensing Event 2009 Joint, Shanghai, China, May 20–22, 2009: 1–5.
- [17] Agilent Technologies. PNA Series Network Analyzers N5230A/C. USA, Sep. 8, 2008: 11–17.
- 曲世勃: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为干涉 SAR 形变监测.
- 王彦平: 男, 1976 年生, 副研究员, 研究方向为干涉 SAR、SAR 三维成像.
- 谭维贤: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为 SAR 成像算法.
- 洪文: 女, 1968 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为 SAR 新概念、新体制、新方法.