



基于子带干涉技术监测大型桥梁形变

吴文豪^{1,2} 李陶¹ 陈志国¹ 徐侃¹ 张校志¹

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉, 430079

2 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室,湖南 湘潭, 411201

摘要: 大跨度桥梁,其变形受风力、温度、车辆等因素的影响,其变化往往达到数十厘米或者更高。这使得利用雷达干涉技术监测其变形存在相位模糊度的问题。子带干涉技术可将距离向宽带频谱分解成两个甚至多个频带,然后进行干涉处理。该技术可以使雷达波长放大 10~100 倍,从而为 m 级的变形监测成为可能。详细介绍了子带干涉技术原理和处理方法,通过分别对风力和温度影响下的青马大桥子带干涉结果进行分析,验证子带干涉技术无需进行相位解缠处理在监测大型人工建筑物形变方面的可靠性和优势。

关键词: 子带干涉;子带分解;相位模糊;大型桥梁;雷达干涉测量

中图法分类号:P225; P208 文献标志码:A

合成孔径雷达差分干涉测量技术具有高空间采样率的优势,能够克服传统方法无法从整体上监测大桥形变的局限性。干涉测量处理得到的干涉图相位是缠绕的,一般通过相位解缠恢复相位真值。为保证足够的采样率,相位解缠时时间维和空间维均要求干涉相位梯度值不能超过 $\pm \pi$ 。大跨度桥梁受风力、温度、车辆等因素的影响,其形变达到数十厘米或更高,形成的雷达干涉条纹过密;桥梁特殊结构产生的雷辔回波阴影、顶底位移等多种原因造成的去相干现象;雷辔回波处理过程中引入的相干噪声、噪声和伪信号等,这些因素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算值不能保持一致。目前,相位解缠依然是干涉处理所面临的主要难题之一。

子带干涉技术可以组合出一个较大的波长,干涉对的高程模糊度以及探测形变速率范围均扩大数十倍,可省去相位解缠的过程,直接用于变形监测。子带干涉技术源于干涉处理中的 Delta-k 技术,20 世纪 60 年代初美国航空航天局首次通过硬件技术发射不同频率的脉冲实现对月球表面的探测,可认为 Delta-k 技术的雏形^[1]。随后 Maden 全面系统地分析了 Delta-k 技术,并指出该技术可以在无需解缠的条件下获得区域 DEM,适合用于地形图制作^[2-3],其他学者也采用该技术

用于植被等物体的探测和积雪深度的探测^[4-6]。Scheiber 等采用了类似方法对配准误差进行估计,Werner 采用该方法提取出电离层闪烁效应^[7]。随着硬件技术的发展,Pascazio 等论证了宽带 SAR 系统实现 Delta-k 技术的可能性^[8-10],2004 年德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)的 Bamler 根据预研的星载高分辨率 SAR 成像系统参数提出了子带干涉方法,认为通过直接对 SAR 系统宽带系统进行子带滤波,可以模拟一个相对于原始波长扩大了几十甚至上百倍的波长,其高程模糊度亦被扩大同样倍数,子带干涉处理后无需再进行相位解缠,克服了低相干区域因相位解缠所带的误差^[11-12]。随着 TerraSAR-X、Cosmo-Skyed 等高分辨率卫星成功发射,这些卫星传感器发送的调频脉冲带宽高达 300 MHz,Eineder 采用 TerraSAR-X 成功进行了子带干涉,可直接用于地形复杂地区 DEM 的提取^[13-14]。夏耶在此基础上,采用差分子带干涉方法并结合角反射器来获取三峡库区的大尺度形变的滑坡监测,也首次对该技术中文命名为“子带干涉”^[15]。本文详细介绍了子带干涉技术原理和处理方法,并采用 TerraSAR-X 影像对香港青马大桥进行形变监测,验证无需相位解缠的子带干涉技术在监测大型人工建筑物形变方面的优势,通过

子带干涉结果进行分析, 进一步验证该技术监测大型人工建筑物形变方面的可靠性。

1 子带干涉原理

SAR 传感器发射调制载波信号的线性调频脉冲, 这些脉冲信号经过远场目标的反射后被雷达接收。为了得到精确的目标参数和较高的分辨率, 雷达系统通常采用匹配滤波器进行匹配滤波来实现脉冲的压缩, 输出类似于 sinc 函数的尖峰, 以确保接收信号的信噪比足够高。脉冲压缩处理时, 脉冲被压缩至脉冲中心, 同时存在一个线性相位穿过脉冲峰值, 该线性相位从物理上可以解释为接收解调数据的中心频率 f_c , 或压缩脉冲的频偏^[16]。干涉处理时, 此线性相位是解算干涉相位的重要依据。SAR 系统在聚焦成像过程中点目标被校正到零多普勒位置, 雷达回波多普勒中心时间也被转化为零多普勒时间, 合成孔径雷达成像后点目标表达式一般为^[11]:

$$\begin{aligned} s_{ac}(\tau, \eta) = & A_0 p_r(\tau - 2R_0/c) p_a(\eta) \times \\ & \exp\left\{-j \frac{4\pi f_c R_0}{c}\right\} \exp\{j2\pi f_{dc}\eta\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, A_0 为常数; p_r 为距离向冲击响应的幅度; p_a 为方位向冲击响应的幅度; 均为 sinc 函数。 τ, η 分别为距离向、方位向参考时间; f_{dc} 为多普勒中心; R_0 为传感器到点目标的零多普勒距离。式(1)中的包络表明, 点目标位于 $\tau = 2R_0/c, \eta = 0$ 处, 点目标被校正至零多普勒位置。此时零多普勒投影的影像干涉相位与主辅影像斜距方向的距离差 Δr 的关系为:

$$\varphi = 4\pi \frac{f_c}{c} \Delta r + 2\pi f_{dc} \cdot \Delta \eta \quad (2)$$

式中, $\Delta \eta$ 为方位向配准误差。因配准误差和多普勒中心差异对相位 φ 影响很小, 一般忽略不计。此时, 式(2)可以简化为:

$$\varphi = 4\pi \frac{f_c}{c} \Delta r \quad (3)$$

进行子带干涉处理, 需要两个带通滤波器将斜距方向上的主辅影像距离向宽带频谱 (u_1, u_2) 分别分解出上下两个频带 $(u_{1,\text{low}}, u_{2,\text{low}}, u_{1,\text{up}}, u_{2,\text{up}})$, 如图 1 所示。假设滤波器通带内的幅频响应为常数, 相移函数为频率的线性函数, 而其他频带内幅频为零, 对主辅图像的上频带和下频带分别做干涉, 等同于上频带和下频带的两张干涉图再做一次干涉, 即为子带干涉结果:

$$\begin{aligned} (u_{1,\text{low}} \cdot u_{2,\text{low}}^*) (u_{1,\text{up}} \cdot u_{2,\text{up}}^*)^* = \\ (u_{1,\text{low}} \cdot u_{1,\text{up}}^*) (u_{2,\text{low}}^* \cdot u_{2,\text{up}}) \end{aligned} \quad (4)$$

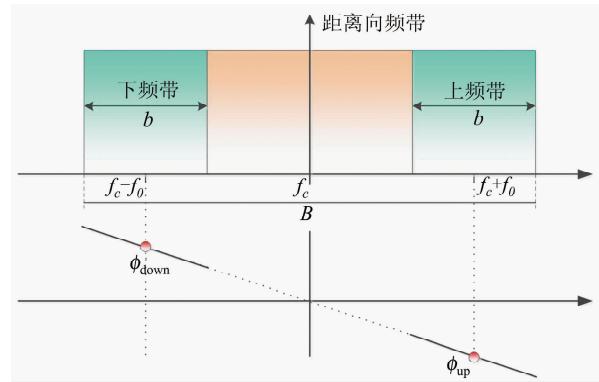


图 1 距离向频带通滤波得到的子带影像频谱

Fig. 1 Bandpass Filtering of the Fullband Images to Obtain the Subband Images

理论上经过带通滤波器滤波后上下频带在频谱域是互不重合的, 可以认为是不相关的。实际上由于带通滤波器的阻带衰减不可能无穷大, 子带信号将产生不同程度的混叠。欲减小子带间的重叠度而又要保证一定的子带带宽, 优化的结果是将原带宽平均分成三等分, 频谱中心分别是 $f_c - f_0$ 、 f_c 和 $f_c + f_0$ 。根据雷达干涉理论, 上下两个子带干涉图的相位分别等于:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{up}} &= 4\pi \frac{f_c - f_0}{c} \Delta r \\ \varphi_{\text{low}} &= 4\pi \frac{f_c + f_0}{c} \Delta r \end{aligned} \quad (5)$$

再次干涉得到的子带干涉图相位代表了每个像素点高频带和低频带的相位差分^[17]:

$$\varphi_{\text{up}} - \varphi_{\text{low}} = 4\pi \frac{2f_c}{c} \Delta r \quad (6)$$

其对应的模拟波长与原波长的比值为:

$$K = \frac{f_c}{2f_0} = \frac{9650}{100} \approx 100 \quad (7)$$

以 TerraSAR-X 卫星为例, 其载波频率为 9.65 GHz, 条带模式脉冲带宽为 150 MHz, 采用带通滤波器从信号取出上下两个子带, 带宽都为原带宽的 1/3, 即 50 MHz, 根据式(7)可以看出子带干涉技术形成了相当于原波长一百倍的模拟波长, 高程模糊度将达到几百 m 甚至数 km, 干涉处理过程中将省去相位解缠环节。

2 子带处理

对 SAR 影像复信号进行子带处理, 可以通过复数调制滤波器(也被称为 DFT 滤波器)实现, 也可以直接在频域内设计滤波器进行子带分解。考虑到处理方便和影像定标问题, 本文通过对具有

低通滤波器性质的重采样插值核调制实现子带分解^[18-19],从而实现辅影像重采样和子带分解同时完成。另外,进行子带滤波时应注意平滑窗效应,地物信号的回波可以近似为无限宽的地物回波频谱,SAR接收到的回波信号是对地物频谱进行采样后得到的。理论上距离向频谱包络类似于矩形,但为了抑制信号的旁瓣效应,在频谱域增加了平滑窗,其频谱表达式为:

$$W(f_r) = (\alpha + (1 - \alpha)\cos \frac{2\pi f_r}{B_r}) \Pi(\frac{f_r}{B_r}) \quad (8)$$

其中,参数 α 控制了窗口的尖细程度,本文所采用的实验数据中的 α 系数为0.6,当然该参数也会因数据的不同发生变化。图2为TerraSAR-X距离向频谱。

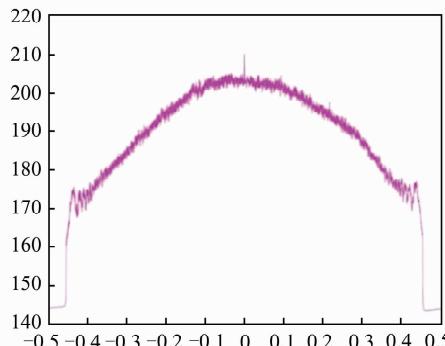


图2 TerraSAR-X原始影像距离线频谱

Fig. 2 Range Spectrum of Original TerraSAR-X Data

为确保子带频谱的统一,进行带通滤波时,需采用反汉明窗消除平滑窗效应,距离向频谱恢复为矩形:

$$W_{\text{InvHamm}}(f_r) = \frac{1}{\alpha + (1 - \alpha)\cos \frac{2\pi f_r}{B_r}} \Pi(\frac{f_r}{B_r}) \quad (9)$$

子带分解时可以将带通滤波和反汉明窗处理同时处理,如式(10),便得到主辅影像的子带信号,其频谱如图3(a)和3(b)所示,可以看出上下频带频谱是对称的,尽管子带并不是基带信号,但不会影响干涉结果,因为干涉时的共轭运算消除了对信号的调制效应。

$$W_{\text{BPFfilt}}(f_r) = W(f_r) \cdot W_{\text{InvHamm}}(f_r) \cdot W_{\text{BPF}} \quad (10)$$

重复观测时SAR传感器位置差异导致主辅影像距离向频谱失配,进而引起了干涉对的失相干。子带干涉因带宽的降低致使其对频谱失配更加敏感,需要同传统的干涉处理一样进行预滤波处理。另外子带分解也会影响到干涉对的相干性,SAR系统传递函数为^[20]:

$$H_i(f_{r,i}, f_{a,i}) = \text{rect}(\frac{f_{r,i}}{B_r}) \text{rect}(\frac{f_{a,i}}{B_a}) \quad (11)$$

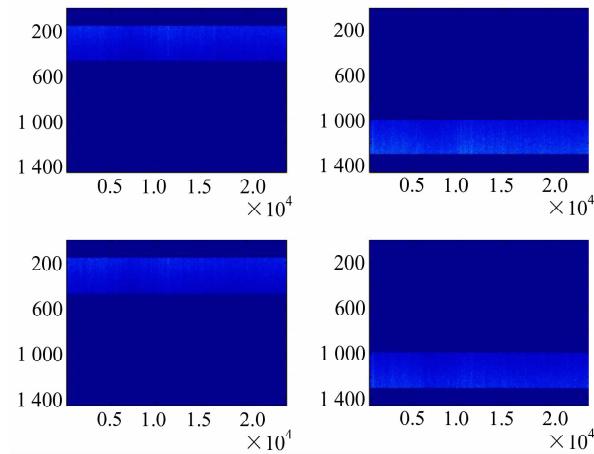


图3 影像距离向子带频谱

Fig. 3 Range Spectrum of Subband

式中, $B_{r,a}$ 表示影像距离向和方位向带宽; $f_{r,a}$ 表示影像距离向和方位向频率; $i(i=1,2)$ 分别表示主影像和辅影像。因为干涉影像对成像几何关系不同,系统传递函数发生偏移,影像的相关性则为:

$$|\gamma| = (1 - \frac{|f_{r,1} - f_{r,2}|}{B_r})(1 - \frac{|f_{a,1} - f_{a,2}|}{B_a}) \quad (12)$$

子带分解后,距离向带宽 B_r 减小,影像的相干性也相应降低,干涉图噪声随之增加^[21-22]。图4(a)是上频带影像的相干系数分布图,与原始干涉图4(b)相比,相干性明显降低。所以子带干涉图噪声较大是子带干涉技术的不足之处。

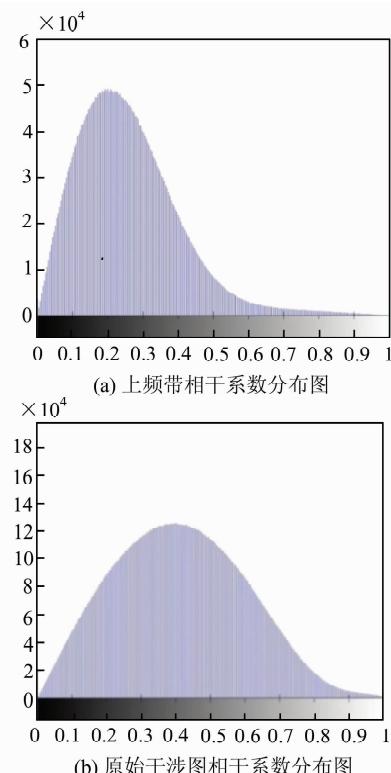


图4 相干系数分布

Fig. 4 Coherence Histogram of Interferogram

3 实验

本文选取时间跨度为 2008-10~2009-12 的 20 景 TerraSAR-X 卫星升轨数据监测香港青马大桥的变形情况,验证子带干涉技术在大型人工

建筑物变形监测中的可行性。青马大桥主跨长 1 377 m,是全球最长的行车铁路双用悬索式吊桥,大桥由于柔度很大,对温度、风和车量荷载非常敏感,易产生较大的变形和振动。车辆高峰期时桥体垂直位移在 14 cm 左右,桥身振动周期为 15 s。依据上述理论,按照图 5 流程,获得

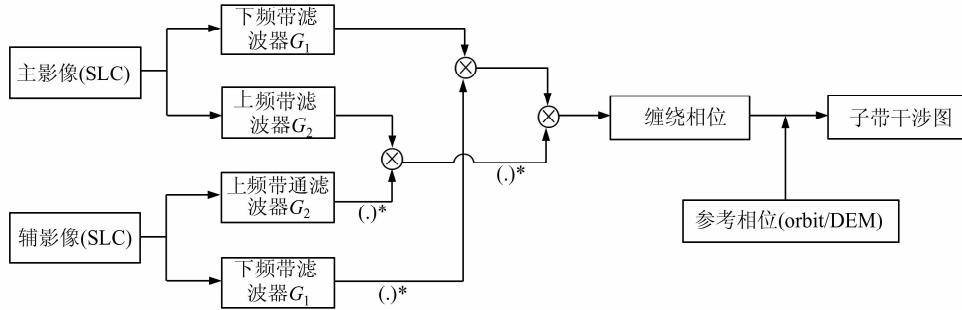


图 5 子带干涉流程

Fig. 5 Flowchart of Split Bandwidth Interferometry

2009-05-11 和 2009-12-06 拍摄的 TerraSAR-X 条带模式影像子带干涉结果。其中影像干涉对基线为 123 m,高程模糊度约为 50 m,由于桥面拱度很小,可认为其主要信号为形变信息。图 6 为青马大桥干涉图。图 6(a)中原始干涉图中大桥出现多个干涉条纹且密度过大,呈现条状,无法解缠,每个干涉条纹相位 $[-\pi, +\pi]$,如果该条纹全部为形变信号,则大桥形变量最大处转为 21 cm,实际上大桥存在一定的拱度,干涉条纹中还包含着桥梁的拱形信息。图 6(b)中子带干涉图中青马大桥干涉条纹约为 45.8° 中,因子带干涉因其较大高程模糊度故可忽略大桥拱形信息,大桥最大形变量为 19.7 cm。子带干涉图的噪声以及悬索吊桥的缆线对桥面反射产生干扰,其干涉处理结果与传统干涉处理存在一定程度的差异也是合理的。子带干涉技术监测大桥中间形变量较大,逐渐向两侧减小,与实际情况相符,而且该技术扩大了形变监测值域范围,省略相位解缠环节,有效避免了因建筑物自身结构产生的干涉条纹的干扰,可以认为其监测结果是可靠的。鉴于青马大桥体积巨大,同时存在点目标和分布目标的回波信号,本文拟通过同质滤波算法抑制斑点噪声,提高干涉图质量。同质滤波作为一种空域滤波算法,主要针对根据 SAR 影像时间序列来确定分布式目标附近的统计同质区域,对同质目标进行滤波处理,不仅可以保留每个点目标的原始信息,还能提高分布式目标信号质量,效果如图 7、图 8 所示。

大桥应变因素主要是风速、温度变化和车流。理论上大桥形变与风速、温度变化呈正比例关系。

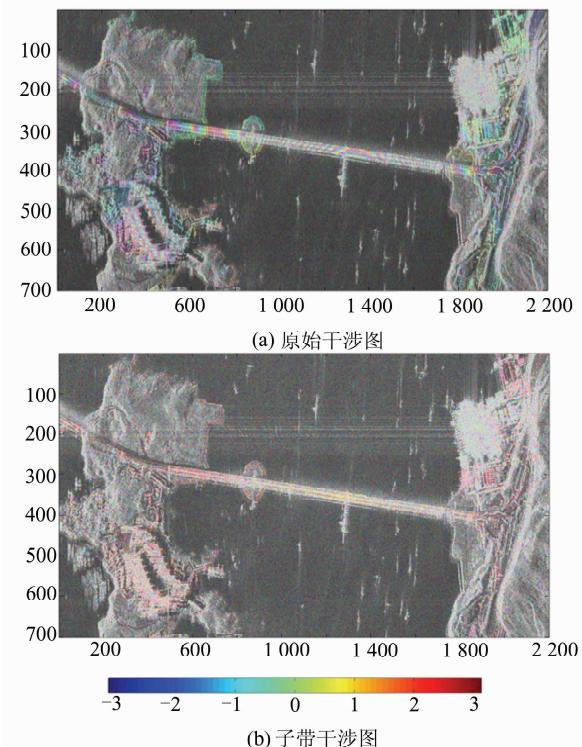


图 6 青马大桥干涉图

Fig. 6 Interferogram of Tsing Ma Bridge

为采用子带干涉技术监测风速对大桥形变的影响,本文选取相隔 11 d 的 12 组干涉对进行子带干涉处理,这样既可以保证影像具有较高的相干性,也可以消除温度变化引起的大桥形变的干扰。另外卫星重复观测同一地区时间基本上一致,可以将车流对大桥形变的影响视为随机噪声。为确保影像配准保持足够高的精度,本文放弃了类似于短基线时序分析,将所有的影像均重采样到同

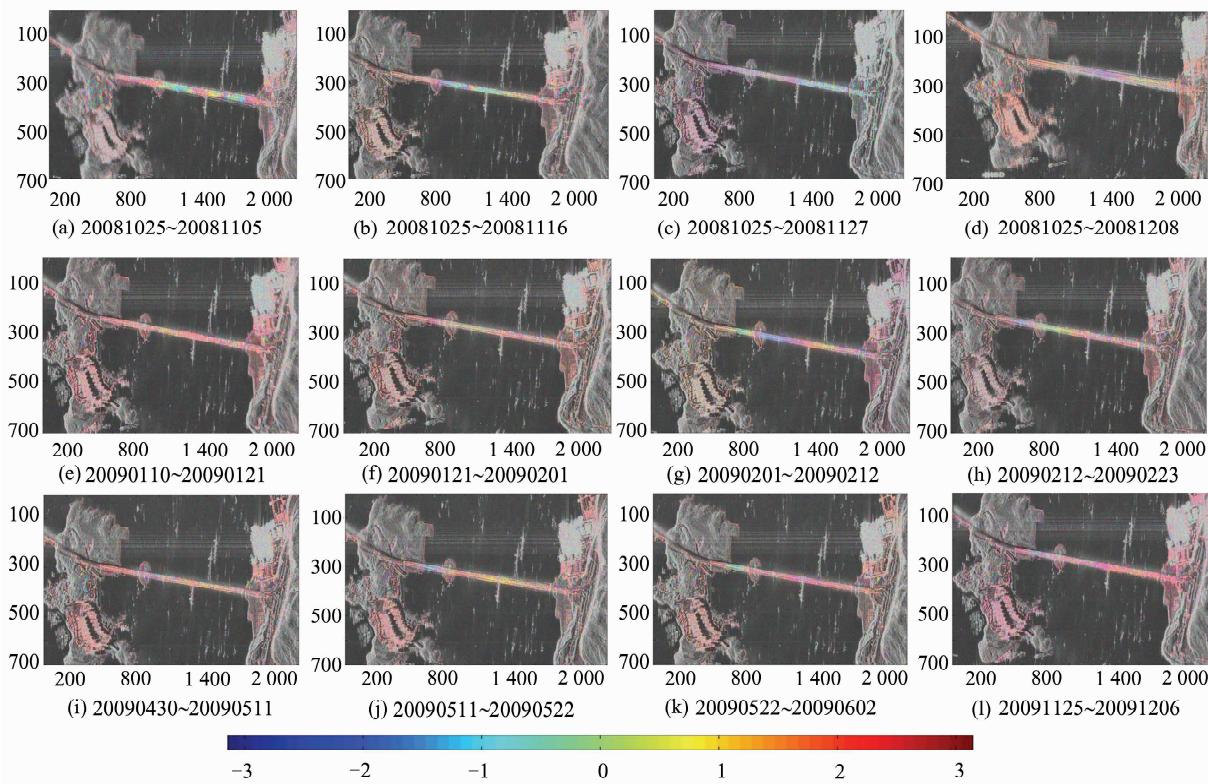


图7 时间基线为11 d的子带干涉图

Fig. 7 Sub-band Interferogram of Temporal Baselines of 11 Days

一几何投影下的方法,而是分别进行配准处理,结果如图7所示^[23]。结果表明冬季大桥形变较大(如11月份干涉对),与之相对应的是香港地区冬季风速较大(图8)。因此,可以推断该条件下大桥形变的主要因素为风速。另外子带干涉图显示大桥形变并不是对称的,传统“点”状测量方式无法获取此类信息,这也是雷达干涉测量空间采样率的优势。

为体现子带干涉技术检测温度对大桥形变的影响,本文选取20090511为主影像,获取8景子带干涉图,干涉结果如图9所示。因大桥主跨中心处雷达回波受到斜拉索的干扰较小,以桥梁左侧陆地区域作为参考点,选取主跨中心处分析大桥形变随时间的变化情况,如图10所示,横坐标代表影像拍摄时间,坐标为形变相位,每弧度相当于大桥形变23 cm。在风速相同情况下桥体形变随时间的变化趋势与温度变化趋势(图11)相同,间接验证了其他文献论证的大桥形变与温度呈现线性关系的结论^[24]。

实验表明,大型人工建筑物的特殊结构往往导致其雷达回波反射机制较为复杂,子带干涉相对于传统的干涉处理存在一定的优势,避免了传统干涉解缠结果的不确定性。但是子带干涉技术还存在一定的不足,特别是干涉图噪声过大的问

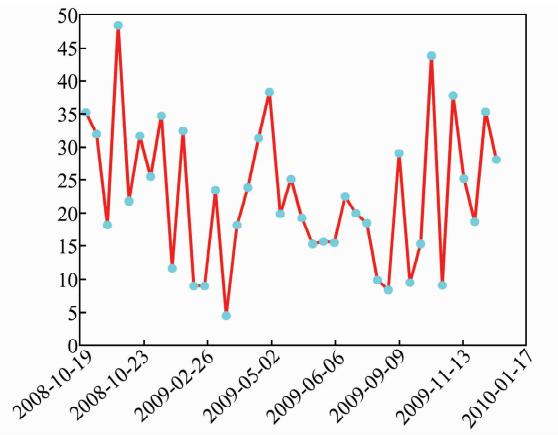


图8 香港地区风速变化

Fig. 8 Variation in Wind Speeds of Hong Kong

题,致使无法对监测目标进行长时间的时序分析。

4 结语

子带干涉技术模拟了一个较大的雷达波长,干涉处理时可以省略解缠环节,扩大形变监测值域范围。本文详细介绍了子带干涉的基本原理和处理流程,并分析子带分解方法以及宽带分解后对影像相干性的影响,以青马大桥作为研究对象,验证子带干涉技术在避开解缠环节情况下监测建筑物形变的可行性,进一步说明子带干涉技术避

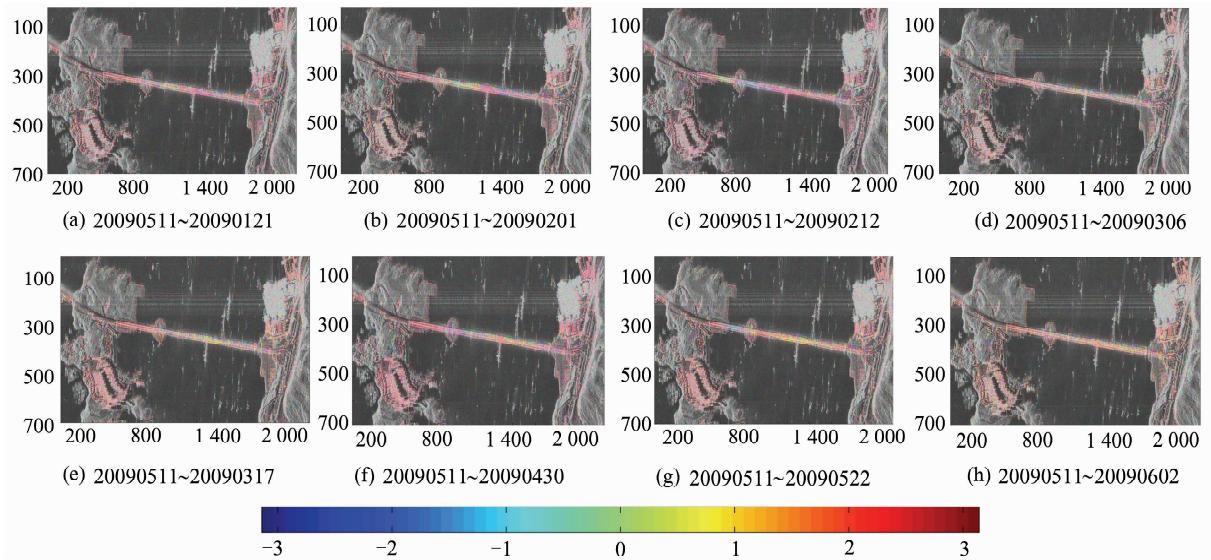


图 9 子带干涉图

Fig. 9 Available Sub-band Interferogram with the Master 20090511

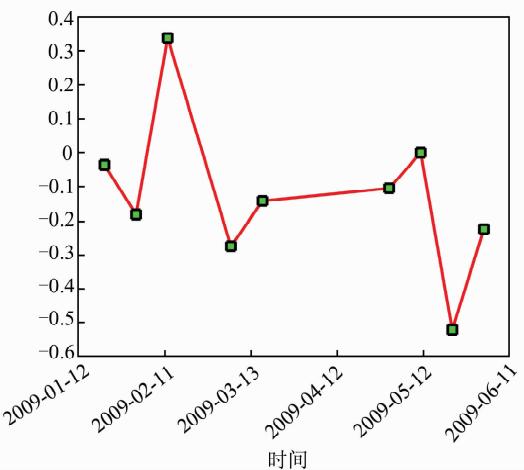


图 10 桥梁中心形变随时间变化

Fig. 10 Variation in Displacement of the Main Spans

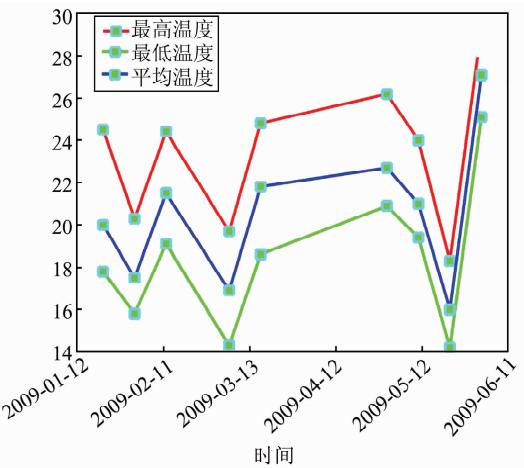


图 11 香港地区温度随时间变化

Fig. 11 Variation in Wind Speeds of Hong Kong

开了因人工建筑物因其复杂的几何形状导致的解

缠困难问题, 直接可以获取绝对相位的优势。因子带干涉图噪声较大, 一般要求干涉对具有较高的相干性, 这样限制了该技术在时间序列监测中的应用。下一步应该考虑子带干涉应结合经典干涉处理方法共同分析监测结果, 实现子带干涉技术与传统干涉技术的优势互补。

参 考 文 献

- [1] Hagfors T. Some Properties of Radio Waves Reflected from the Moon and Their Relation to the Lunar Surface[J]. *J Geophys Res*, 1961, 66 (3): 777-785
- [2] Madsen S N, Rosen P A, Imel D A, et al. Absolute Phase Determination Techniques in SAR Interferometry[C]. Conference on Radar Sensor Technology SPIE, Pasadena, 1995
- [3] Madsen S N, Zebker H A. Automated Absolute Phase Retrieval in Across-track Interferometry [C]. IGARSS, IEEE, Houston, 1992
- [4] Sarabandi K. Delta-k Radar Equivalent of Interferometric SAR's: A Theoretical Study for Determination of Vegetation Height[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1 267-1 276
- [5] Delta K. Interferometric SAR Technique for Snow Water Equivalent(SWE) Retrieval[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(2): 57-61
- [6] Pascazio V, Schirinzi G. Multifrequency InSAR Height Reconstruction Through Maximum Likelihood Estimation of Local Planes Parameters [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 1(2): 57-61

- [7] Scheiber R, Moreira A. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity [J]. *IEEE Trans GRS*, 2000, 38(5): 2 179-2 191
- [8] Pascazio V, Schirinzi G. Estimation of Terrain Elevation by Multifrequency Interferometric Wide band SAR Data [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2001, 8(1): 7-9
- [9] Veneziani N, Bovenga F, Refice A. A Wide-band Approach to the Absolute Phase Retrieval in SAR Interferometry [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2003, 14(1/2): 183-205
- [10] Veneziani N, Bovenga F. A Frequency-domain Differential Approach to the Absolute Phase Retrieval in SAR Interferometry [C]. IGARSS, Honolulu, 2000
- [11] Bamler R, Eineder E. Accuracy of Differential Shift Estimation by Correction and Split-band Width Interferometry for Wideband and Delta-k SAR Systems [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 151-155
- [12] Xu Caijun, Wang Hua. Comparison of InSAR Phase Unwrapping Algorithms and Error Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(1): 67-70(许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法比较及误差分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(1): 67-70)
- [13] Eineder M, Adam N. High Bandwidth Spotlight SAR Interferometry with TerraSAR-X [C]. IGARSS, IEEE, Boston, 2008
- [14] Brück R, Eineder M, Bamler R. Absolute Phase Estimation from TerraSAR-X Acquisitions Using Wideband Interferometry [C]. CEOS SAR, DLR Oberpfaffenhofen, Germany, 2008
- [15] Xia Ye, Fan Jinghui. An Application for Landslide Monitoring by High Resolution SAR in Three Gorge Area [C]. The 18th Conference on Remote Sensing of China, Wuhan, 2012(夏耶, 范景辉. 高分辨率雷达数据三峡库区滑坡监测技术[C]. 第十八届中国遥感大会, 武汉, 2012)
- [16] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood : Artech House, 2005
- [17] Bamler R, Eineder M. Accuracy of Differential Shift Estimation by Correlation and Split-Bandwidth Interferometry for Wideband and Delta-k SAR Systems [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2005, 2 (2): 151-155
- [18] Keys R G, Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1981, 29 (6): 1 153-1 159
- [19] Hassen R, Bamler R. Evaluation of Interpolation Kernels of SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37 (1): 318-321
- [20] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echos [J]. *IEEE Transactions in Geosciences and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959
- [21] Just D, Bamler R. Phase Statistics of Interferograms with Applications to Synthetic Aperture Radar [J]. *Appl Opt*, 1994, 33(20): 4 361-4 368
- [22] Schwabisch M, Geudtner D. Improvement of Phase and Coherence Map Quality Using Azimuth Prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR [C]. IGARSS, Firenze, 1995
- [23] Jiang Liming, Lin H, Ma J, et al. Potential of Small-baseline SAR Interferometry for Monitoring Land Subsidence Related to Underground Coal fires: Wuda (Northern China) Case Study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 257-268
- [24] Xu Y L, Chan W S. Wind and Structural Monitoring of Long Span Cable Supported Bridge with GPS [C]. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, 2009

The Application of Split Band Interferometry in Large-scale Bridge Monitoring

WU Wenhao^{1,2} LI Tao¹ CHEN Zhiguo¹ XU Kan¹ ZHANG Xiaozhi¹

¹ GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China

Abstract: The bridge displacement responses can move from several centimeters to several meters in-

(下转第 420 页)

- havior in High-rise Building Fire[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013(袁启萌. 高层建筑火灾情景下人群疏散行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2013)
- [19] Luo Qian. Amended Social Force Model and Simulation of Evacuation[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2010(罗茜. 人员疏散的社会力修正模型及其仿真研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2010)
- [20] Fang Xing, Huang Peiqing, Huo Liangan. Progress in the Research on Crowd's Emergency Behaviors in Large-scale Events[J]. *China Safety Science Journal*, 2011(11):22-28(方星, 黄培清, 霍良安. 大型活动中人群的应急行为研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2011(11):22-28)

Cognitive Rules of People Choosing Routes in Large Stores

YANG Jie¹ YANG Nai¹ HUANG Ting² LIU Qizhi¹ HU Weilu¹ DENG Dawei¹

1 Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: We study the cognitive rules of people choosing routes in large stores by using online questionnaires, finding that people at different gender, ages, educational background can make the same decision when they are faced with the choice of the stair or route to go upstairs or downstairs. People have obvious tendency when they go upstairs but do not have obvious tendency when they go downstairs. Most people will choose the escalator when the floor span is below or equal to two. However, most people will choose the elevator when the floor span is more than two. These rules are quite valuable for the analysis of the optimal path when the two points in indoor space are on different floors.

Key words: indoor space; indoor GIS; routing choice; spatial cognition; optimal path analysis

First author: YANG Jie, master, specializes in spatial analysis and map visualization. E-mail: yangj_cug@163.com

Corresponding author: YANG Nai, PhD, lecturer. E-mail: naiger@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41201474, 41401449, 41101351.

(上接第 340 页)

duced by a combination of four major types of loading due to wind, temperature, highway, and railway. One of the main challenges of InSAR technique is phase unwrapping. One can take advantage of this wide band to split it into sub-bands and determine the phase-frequency gradient between the sub-band interferograms. This simulates a SAR system with a much longer carrier wavelength than the actual one, which makes it possible to monitor the meter-scale deformation. This paper presents the theory and method of split bandwidth interferometry in detail, and the effectiveness and advantage of split bandwidth interferometry was verified in feasibility of monitoring structural deformation of Tsingma Bridge under the influence of different factors.

Key words: split band interferometry; sub-band decomposition; phase ambiguity; large-scale bridge; synthetic aperture radar interferometry

First author: WU Wenhao, PhD candidate, specializes in the theories and methods of InSAR processing. E-mail: wuwh@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41274048, 41474014; the Open Research Fund Program of Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-Utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, No. E21502.