

文章编号: 2095-4980(2016)05-0723-07

GBSAR 系统的发展及其形变监测应用

李俊慧, 王 洪, 汪学刚, 燕 阳

(电子科技大学 电子工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 详细叙述了主要的地基合成孔径雷达(GBSAR)系统, 总结了其发展过程, 归纳了各系统的特点和关键参数, 分析了 GBSAR 系统的形变监测应用的优势和限制条件, 也对 GBSAR 系统的斜坡、结构体、冰川和雪主要 3 类监测应用的研究现状进行了概括, 得出了 GBSAR 系统在这 3 类形变监测应用上的优点和需改善的方面。

关键词: 地基合成孔径雷达; 形变监测; 地基合成孔径雷达系统

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0723

Development of GBSAR system and deformation monitoring application

LI Junhui, WANG Hong, WANG Xuegang, YAN Yang

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: The main Ground Based Synthetic Aperture Radar(GBSAR) system is described in detail. Its development process is summarized. The characteristics of the GBSAR system and its key parameters are generalized. The advantages and limiting conditions are analyzed while applying the GBSAR system to the deformation monitoring. The status quo and aspects for improvement of GBSAR system are concluded aiming to the three main kinds of deformation monitoring application.

Key words: Ground Based Synthetic Aperture Radar(GBSAR); deformation monitoring; GBSAR system

地基合成孔径雷达(GBSAR)利用传感器沿着导轨运动形成合成孔径, 不仅可测量接收信号的幅度, 也可测量相位。其主要应用是形变监测, 与星载 SAR 一样, 都需要使用干涉技术来推导出测量区域的形变和地形信息。GBSAR 的传感器沿着固定的导轨滑动, 省去了星载 SAR 数据处理中基线估计。GBSAR 系统测量是相对形变, 不需要去地平效应, 重复观测时间短, 以分钟为单位, 观测距离一般是几公里, 可实现对局部区域的高精确度高分辨力成像。由于系统体积小, 可根据目标区域特点选择相应的观测平台来满足形变监测的需求, 因此, 在测量上具有灵活性的优势。同时, GBSAR 系统对小形变的高度敏感性, 使得 GBSAR 系统与其他形变测量技术互补。

1 GBSAR 系统发展

GBSAR 系统对大坝位移的监测, 展示了 GBSAR 系统在民用工程上的应用潜力^[1]。2003 年, Ellegi-LiSALab 公司获得欧洲联盟综合研究中心(Joint Research Centre of the European Commission, JRC)利用 LiSA(Linear SAR)技术的许可, 商业开发的第 1 个系统称为 LiSA 系统, 后来发展为 LiSALab 系统。

之后发展的先进传感器提高了 GBSAR 的稳定性、带宽能力和通用性。在这些传感器中, 中国科学院电子学研究所(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, IECAS)微波成像国家级重点实验室(The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, MITL)研制了 ASTRO(Advanced Scannable Two-dimensional Rail Observation)系统, 该系统采用步进频连续波(Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW)体制, 而且有多种工作模式。意大利 Ingegneria Dei Sistemi(IDS)公司提供的 IBIS(Image By Interferometry Survey)-S/L/M, 也采用 SFCW 体制雷达, 并展示出大量的应用, 是目前最受欢迎的商用的 GBSAR 传感器。还有其他一些 GBSAR 系统, 如, 英国谢菲尔德大学研究的 GBSAR 系统, 日本东北大学研究的宽带极化 GBSAR 系统, 这些系统都是通过线性扫描来获得合成孔径, 而韩国的地球科学和矿产资源研究所(Korea Institute of Geoscience and Mineral

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61139003)

Resources, KIGAM)研究的地基 ArcSAR(Arc-Scanning SAR)系统采用的是角扫描。

最近 10 年内, SFCW 信号模型被高速率的步进调频连续波(Stepped Frequency Modulated Continuous Wave, SFMCW)信号模型所取代。与之前的 GBSAR 对比, SFMCW SAR 传感器能够更快地扫描, 扫描时间减少一个数量级。这不仅将对流层的干扰影响降到最低, 也减少了目标在扫描时不稳定的振幅和相位的失真。MetaSensing 公司介绍的 FastGBSAR 概念, 就是利用 SFMCW SAR 传感器, 将快速扫描时间提到 4 s, 得到 1 幅图像。更快的扫描导致 GBSAR 使用永久散射干涉(Permanent Scatters Interferometry, PSI)技术检测地面位移的性能显著改善。极化 RiskSAR 传感器就是这样一个实例, 从 2004 年, 西班牙加泰罗尼亚理工大学(Universitat Politècnica de Catalunya, UPC)的遥感实验室(Remote Sensing Laboratory, RSLab)就不断发展极化 RiskSAR 传感器。

最近几年, 出现了新型的 GBSAR 系统。瑞士 Gamma Remote Sensing 公司提出以实孔径雷达(Real Aperture Radar, RAR)为基础的 GPRI(Gamma Portable Radar Interferometer)系统, 具有与 SAR 相同的监测性能; 乌克兰国家科学院(the National Academy of Sciences of Ukraine, NASU)的放射物理电子研究所发展了以噪声雷达技术为基础的 GBNWSAR (Ground Based Noise Waveform SAR)传感器。主要的 GBSAR 系统的研究机构和研究阶段见表 1。

1.1 以 VNA 为基础的系统

1.1.1 LiSA 系统和 LiSALab 系统

LiSA 系统^[2]采用线性调频信号体制, 发射和接收天线放置在电脑控制的定位器上, 在方位向定位器移动合成线性孔径。工作波段在 C 波段和 Ku 波段, 发射功率为 25 dBm, 极化方式有 VV, HH, VH 和 HV。测量频率范围 16.70 GHz~16.78 GHz, 频率采样点数为 1 601 点, 频率步进值为 50 kHz, 合成孔径长度为 2.8 m, 相对应的采样数是 401, 研究区域的平均距离是 1 000 m, 成像区域的距离和方位范围都是 800 m。理想的距离和方位分辨力是 1.9 m 和 3.2 m, 天线 3 dB 波束宽度约为 20°, 天线照射在 1 000 m 处方位范围为 350 m。每天可获得 40 幅图像(约 30 min/每幅图像), 标准的测量形变精确度是 0.02 mm~4 mm。对奥地利一个村庄的斜坡进行了监测, 验证了系统的实用性。

LiSALab 系统, 后称为 Ellegi srl, 该系统是 LiSA 系统的自然进化。工作在 Ku 波段, 平均 12 min 可以获得 1 幅图像, 距离分辨力可达 0.5 m, 方位分辨力在 1 km 处可达 3 m, 标准的形变监测精确度为 0.01 mm~3.2 mm。对意大利卡拉布里亚的一个滑坡进行监视时^[3], 在 2 m 长的线性导轨上扫描, 发射带宽为 200 MHz 的 SFCW 信号, 载频为 17.1 GHz, 离散频率值在 17 GHz~17.2 GHz, 可取得的距离分辨力是 0.75 m, 探测距离从 100 m 至 400 m, 在 100 m 处的方位分辨力是 0.44 m, 在 400 m 处的方位分辨力是 1.75 m。由于该系统的监测, 高速公路能重新开放, 表明了该系统对滑坡紧急事件监视的有效性。

1.1.2 ASTRO 系统

中国科学院电子学研究所微波成像国家级重点实验室研制了 2D 的 GBSAR 的 ASTRO 系统^[4], 该系统采用 SFCW 信号, 有 MIMO、多极化工作模式(单极化或者全极化模式 HH, VV, HV, VH), 可进行多基线 SAR 层析、二维扫描、多维孔径合成(2D 导轨)、三维 SAR 成像等实验。工作在 Ka 波段, 测量形变精确度在毫米级别。

1.1.3 IBIS-S/L/M 系统

IBIS-S/L/M 系统^[5-6]由意大利 IDS 公司和佛罗伦萨大学联合开发, 用于大型构筑物和地表的形变监测。系统采用 SFCW 信号体制, 其工作频率为 16.6 GHz~16.9 GHz(Ku 波段), 水平直线导轨长 2 m, VV 极化方式测量, 测程为 200 m~4 km。距离向分辨力为 0.5 m, 方位向分辨力在 1 km 处为 4.5 m, 采集图像最短时间为 5 min, 形变测量精确度可达亚毫米级(0.1 mm)。

1.1.4 各国大学的 GBSAR 系统

英国谢菲尔德大学研究的 GBSAR 系统^[7], 工作在 X 波段和 C 波段, 液压升降机可升高 SAR 传感器到 10 m 的高度, 使用 4 m 长的线性导轨, 放置一个全极化天线, 目标区域 2 000 m², 利用该系统进行场外实验, 为了检测庄稼的参数, 对小麦的散射系数进行了 3 cm~6 cm 的分辨测量。

日本东北大学研究的 GBPBSAR 系统^[8], 对地面植被的极化 SAR 遥感监测进行了验证。系统工作频率 400 MHz~6 GHz, 可以扩展范围 50 MHz~20 GHz(S, C, X 波段), 扫描孔径在水平方向为 20 m, 在垂直方向为 1.5 m。在标准的反射体实验下, 表明了系统的极化测量能力。使用该系统, 对仙台市的特殊植被进行测量, 形成了 3-D

表 1 主要的 GBSAR 系统的研究机构和研究阶段

Table 1 Research institutes and research stages of the main GBSAR systems

system	research institutions	research stage
LiSAR	JRC	research
LiSAR Lab	Ellegi srl	product
ASTRO	IECAS MITL	research
IBIS-S/L/M	IDS	product
-	the University of Sheffield	research
GBPBSAR	the University of Tohoku	research
ArcSAR	KIGAM	research
Fast GBSAR	meta sensing	product
RiskSAR	UPC RSLab	research
GPRI	GAMMA Remote Sensing	product
GB NW-SAR	NASU	research

的极化图。系统可以检测出3种不同植物,为植物的散射机理提供有价值的信息。

韩国的KIGAM研究的地基ArcSAR系统,安装在卡车上,吊杆可以从2.19 m伸长到4.19 m。系统^[9]通过水平圆周运动形成孔径。ArcSAR系统有2种不同成像模式:聚束spot模式和扫描scan模式,后者获得更广范围图像,比前者的分辨力低。一个典型的X波段(9.65 GHz)的ArcSAR,带宽为0.3 GHz,距离分辨力为0.5 m,天线孔径长度为0.15 m,聚束模式下图像覆盖180°,方位分辨力是0.07°,扫描时间是14 min;扫描模式下的图像覆盖350°,方位分辨力是1.07°,相比角度扫描实孔径系统的11.84°方位分辨力,扫描时间为27 min。

1.2 以 SFMCW 为基础的系统

1.2.1 FastGBSAR 系统

MetaSensing公司研发的FastGBSAR系统,具有独特的设计、紧凑的传感器,容易安装,在艰难的工作环境也可以操作,用来监视形变、不稳定自然元素(滑坡、露天开采的矿山)和人造结构(建筑物、大坝、塔、桥)的震动。系统^[10]工作在Ku波段,采用SFMCW的远程遥感设备,可连续监视大区域形变。数据采集小于5 s,克服了市场上相似的商用系统的限制,即由于当地的大气变化导致的低时间相干。具有高的空间分辨力,在距离向为0.5 m至0.75 m,在方位向为4.5 mrad,还具有亚毫米的形变测量精确度,即使在几千米远处,也不需要现场操作员。系统可用在SAR和RAR模式,传感器是通用的。

1.2.2 RiskSAR 系统

西班牙加泰罗尼亚理工大学开发的极化RiskSAR系统^[11]可以快速扫描,时间小于3 min。使用LSFMCW信号,扫描时间得到很大改善,满足采集时间内对流层的均匀性需要,且支持PolSAR测量。系统传感器工作在C、X和Ku波段,合成孔径长度是2 m。工作在C波段时,载频为5.3 GHz,采样率为49.06 MHz,带宽为50 MHz,距离分辨力为3 m,发射功率为33 dBm,3 dB天线波束宽度为32°,单极化扫描时间为1 min,全极化扫描时间为2.5 min;工作在X波段时,载频为9.65 GHz,采样率为81 MHz,带宽为120 MHz,距离分辨力为1.25 m,发射功率为30 dBm,3 dB天线波束宽度为27°,单极化扫描时间为1 min,全极化扫描时间为2.5 min;工作在Ku波段时,载频为17.5 GHz,采样率为81 MHz,带宽为200 MHz,采样率为0.75 m,3 dB天线波束宽度为25°,单极化扫描时间为2 min,全极化扫描时间为5 min。工作在X波段的该系统对加泰罗尼亚比利牛斯山脉进行监测,方位分辨力从最近距离的0.75 m到最远距离1 600 m的6 m,形变测量精确度为1.6 mm。

1.3 新型的系统

1.3.1 GPRI 系统

2005年,瑞士的GAMMA Remote Sensing公司开发了基于实孔径技术(RAR)的SFMCW雷达干涉设备:GPRI系统^[12-13],用来测量形变和地形映射,工作频率17.2 GHz(Ku波段),采集时间:70°时小于20 min,操作距离为0.1 km~4 km,天线孔径为0.4°×60°,带宽200 MHz,距离分辨力0.75 m,方位分辨力在1 km处6.9 m,在2 km处13.9 m,形变测量精确度小于2 mm,设备包含1幅发射天线和2幅接收天线,2幅接收天线可以形成干涉基线,通过改变基线来调整高度敏感性和相位解缠复杂性。

1.3.2 GB NW-SAR 系统

乌克兰国家科学院设计的Ka波段的GB NW-SAR系统^[14]使用的是噪声雷达技术和通过辐射槽的滑动的合成孔径天线技术(Synthetic Aperture Antenna, SAA)。使用差分干涉技术,测量大型物体的小形变,这个系统可用来提前探测灾难性变化。系统有收发分置双站模式和单站模式。发射是通过一个非移动的角状天线,接收是通过SAA。收发分置模型也使用SAA进行发射,提供更高的方位分辨力。系统的距离分辨力都为0.3 m,使用CW噪声信号。滑动模式的SAA可以取得更高的相位精确度,Ka波段的噪声产生器可在500 MHz带宽输出150 mW的功率,在3 h内获取13幅图像,形变测量精确度可达0.1 mm。各系统的特点和关键参数归纳总结如表2所示。

2 GBSAR系统形变监测应用的优势和限制条件

2.1 GBSAR系统形变监测应用的主要优势

GBSAR系统形变监测应用的主要优势归纳为如下5点:

- 1) 应用GBSAR技术的系统在形变监测应用中很灵活、通用,监测的形变率具有很大的范围,可从1年的几毫米到1 m/h^[2]。
- 2) 形变估计值的精确度从亚毫米到几毫米,与目标的特性(反射越强,精确度越好)、传感器到目标的距离、

参考点的距离等因素有关。系统估计人造目标的形变,精确度在 1 mm 以下。

3) 测量距离可达几千米,远大于其他测量方式,如地面三维激光扫描、地形总站。

4) GBSAR 图像典型的可覆盖 $1\text{ km}^2\sim 2\text{ km}^2$ (面积),覆盖的是高相关区域,相对“点”测量技术,如 GPS、全站仪等,可测量观测场景的密集范围^[2]。

5) 整个形变监测过程可高度自动化。当有威胁的形变现象需要监测时,设备可以安装在目标区域的外面。

表 2 主要的 GBSAR 系统的关键参数

system	band	polar mode	scanning mode	rail length /m	acquisition time (min/each image)	range resolution /m	azimuth resolution	deformation measurement precision/mm
LiSAR	C,Ku	VV,HH,HV,VH	linear	2.8	30	1.9	3.2 m	0.02–4
LiSAR Lab	Ku 17.1 GHz	VV	linear	2	12	0.5	3 m	0.01–3.2
ASTRO	Ka	single- VV,HH,VH,HV	curve	2.6	–	–	–	millimeter
IBIS-S/L/M	Ku	VV	linear	2	5	0.5	4 m	0.1
– (UK)	C,X	VV,HH,VH,HV	linear	4	–	–	–	–
GBPBSAR	S,C,X	VV,HH,VH	linear	H:20 V:1.5	–	–	–	–
ArcSAR	X 9.65 GHz	VV,HH,VH,HV	angular	2	14 min(spot) 27 min(scan)	0.5	0.07°/180° 1.07°/350°	–
FastGBSAR	Ku	–	linear	2.5	5 s	0.5–0.75	4.5 mrad	sub millimeter
RiskSAR	C 5.3 GHz	single VV,HH,HV,VH	linear	2	C: 1, 2.5	3	4 m	1.6
	X 9.65 GHz				X: 1, 2.5	1.25		
	Ku 17.5 GHz				Ku: 2, 5	0.75		
GPRI	Ku 17.2 GHz	VV	angular	–	20 min/70°	0.75	6.9 m	2
GB NW-SAR	Ka	–	angular	–	14	0.3		0.1

2.2 GBSAR 系统形变监测应用的主要限制

GBSAR 系统形变监测应用的主要限制条件可归纳为以下 4 点:

1) GBSAR 干涉用于提取形变的数据必须具有相干性。当对区域进行不连续监测活动时,相干性会严重下降。在某些情况下,相干性的缺乏可以通过放置人工反射器来克服^[6]。

2) 干涉相位的模糊,可能会引起有偏的形变估计,特别是在那些遭受着很大的形变区域。

3) 只能测量 GBSAR 传感器的视线(Line Of Sight, LOS)方向的形变,不能测量垂直于 LOS 方向的形变。而其他技术,例如全站仪、GPS 等,可以提供三维的形变测量。

4) 形变测量精确度会受大气相位估计的影响^[15],正确估计大气相位需要形变区域的周围存在稳定区域,在孤立的相干区域是不能正确估计大气相位的。

3 GBSAR 系统的形变监测应用

对 GBSAR 系统的主要的形变监测应用根据研究的状况和类型进行分类和总结,见表 3。

3.1 斜坡

GBSAR 系统最成熟的应用是对斜坡的监测。2003 年,Leva 等人使用 LiSA 系统对奥地利村庄的滑坡进行监视^[2],得到的形变估计图与全球定位系统的测量一致,表明了 GBSAR 技术是对滑坡监测的有效手段。2009 年,Herrera 等人对滑坡进行了研究^[16],对比了传统监测技术(全站仪、差分 GPS)和 GBSAR 监测技术,提出了滑坡的预测模型。2011 年,Del Ventisette 研究 GBSAR 监视滑坡^[3],预防紧急事件的发生,保证高速公路的安全。总之,GBSAR 滑坡监视应用在最近几年里的研究已经很成熟,表明了这项技术在监视不同情形下的滑坡的可用性。

斜坡监测应用也包含对露天煤矿的斜坡监测。2014 年,福建一家公司对紫金山金铜矿利用 GBSAR 系统进行了连续多天边坡形变监测,获取了长时间序列回波。通过定标器位置测量,验证了系统数据处理方法和流程。对比了定标点全站仪和雷达数据结果,GBSAR 系统具有更高的监测精确度和有效性。

事实上,GBSAR 技术对露天煤矿的监视经历了系统和数据处理水平的强劲发展,可作为早期预警工具^[17]。

斜坡不稳定性监测, 其中火山监测也是 GBSAR 主要监测应用^[6,18]。尽管很多文献里研究斜坡不稳定性监测, 且应用在不同的地点, 但仍需技术方面的改善。现在可用的 GBSAR 系统大部分工作在 Ku 波段。在相同的场景下, 系统的工作波长越长, 如 X,C,S 波段等, 在相干性和暂时去相关就有更好的性能^[2]。然而, 因为 Ku 波段的系统对观察场景的小变化非常敏感, 在自然环境条件下引起的相干损失是普遍的。进一步而言, 相干性的损失会引起混叠^[6]。特别地, 相干性损失会影响不连续 GBSAR 监测。另外一个重要的问题是, 在不连续监测模式下, 需要改善滑坡或者斜坡监视的大气模型。尽管有很多文献提出了不同的方法, 对于不均匀大气对斜坡监视的影响, 没有很可靠的解决方案^[15]。

表 3 GBSAR 系统形变监测应用的研究状况
Table3 Research status of deformation monitoring application of GBSAR system

application class		current research status	advantage	need improvement
slope	landslide	mature	high spatial and temporal sampling rate distance monitoring early warning system weatherproof	inhomogeneous atmospheric effect, coherency loss phase unwrapping error
	slope of the open pit coal mine	mature	high spatial and temporal sampling rate early warning system weatherproof profile image	inhomogeneous atmospheric effect coherency loss
	volcano	research	high spatial and temporal sampling rate early warning system weatherproof	inhomogeneous atmospheric effect coherency loss
structure	buildings bridge	mature	high spatial and temporal sampling rate highly sensitive for small deformation equipment placed outside the building	precise geometry diagram precise code other distribution signal high cost
	dam	mature	high spatial and temporal sampling rate highly sensitive for small deformation equipment placed outside the dam	other distribution signal high cost
natural phenomenon	glacier	research	high spatial and temporal sampling rate distance monitoring	phase unwrapping error inhomogeneous atmospheric effect low precision
	slope of snow	early stage of research	under certain conditions use phase to estimate the snow water; detect avalanche snow depth	need other relevant data

3.2 结构体

GBSAR 系统的另外一个重要的形变监测应用是对大型结构体的监测, 主要是建筑物监测^[19-20]和大坝监测^[1,5-6]。GBSAR 系统对大型结构体监测的主要优势是遥远的探测能力、高时空采样能力和对小形变的高度敏感。Tapete、Leva 等联合研究了 GBSAR 和 TLS 综合使用来获得 3-D 干涉雷达点迹, 解释影响考古遗迹的形变。逐点和及时探测形变异常现象证明了这种方法的适用性, 可支持预警, 也可估计人类活动对古迹的影响。Pieraccini 在 2006 年^[19]也采用了这 2 种技术进行监测, 分开进行 GBSAR 和 TLS 监测活动, 对 2 种技术的输出结果进行综合, 经过处理来得到 3-D 几何形变图。

对于大坝的监测, 1999 年, Tarchi 等使用 LiSA 系统^[1], 证实了其在实际监测大型结构的形变的可行性, 并提供足够的精确度, 而且可生成结构整个表面的形变图, 提供更多信息来控制结构的变化。2008 年, Alba 使用 IBIS 系统对对拱形大坝进行监测^[5], 测量的形变结果与安装在大坝中心的坐标测量仪的测量结果相符。与其他测量技术相比, GBSAR 系统有更高的数据采集率, 系统自动化程度高, 操作方便, 使得 GBSAR 的连续监测成为可能。西班牙的测绘研究所 Luzi 等在 2010 年, 使用 2 种地基雷达技术, RAR 和 SAR, 对大坝进行了监视实验^[6]。SAR 技术的 2-D 成像利用干涉技术可得到亚毫米级的形变测量精确度, 也可得到观测区域的整个表面; 而 RAR 是可以测量和监视人造结构的一维信息。应用这 2 种技术的系统都被证明是有效的形变监测工具。2013 年, 武汉大学的测绘地理信息实验室对隔河岩水电站利用 IBIS-L 系统对水电站主坝等目标物进行了连续监测, 观测距离为 1 300 m 左右, 在观测周期内, 大坝的整体形变未超过 1.5 mm, 部分时段的小区域相对大坝其他区域形变不一致, 形变值不超过 2 mm, 表明 GBSAR 系统可获取高精度度的大坝表面整体形变信息。

3.3 冰川和雪

最近几年, 使用 GBSAR 系统对冰川进行监测研究, 参考一些文献可以看出这项技术对冰川变化的监测的潜力^[21-22]。GBSAR 系统在某些情况下, 在对冰川进行连续监测期间, 系统的采集时间对于冰川的变化速度相对较长。尽管说, 大部分文献中对于冰川的监测应用是采用连续监测模式, 但是, 对冰川的不连续监测, 可以得到冰川高度的变化, 不同采集活动可生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)图。

还有一系列的应用与被雪覆盖的斜坡有关,其中雪水当量和雪崩探测仍处在初期研究阶段。Morrison^[23]在 2007 年使用 GBSAR 系统对奥地利阿尔卑斯山脉的冰雪变化进行测量。Martinez-Vazquez 在 2005 年到 2008 年期间^[24],使用 LiSA 系统,对冰雪覆盖区域进行监测,对获得的图像进行处理,依据从所有图像提取的数据和区域的特征对雪崩进行分类,提出雪崩分类算法,为商业滑雪胜地的雪崩风险评估提供了参考。

4 结论

本文详细总结了目前主要的 GBSAR 系统的特点和关键参数。分析了 GBSAR 系统的形变应用优势和限制条件。GBSAR 系统的形变监测应用分三大类,最成熟的是对斜坡的监测,主要是滑坡、露天煤矿和火山的应用,但对于相干损失问题,GBSAR 系统的形变监测技术在这方面仍需提高。对结构体的监测也相对成熟,主要包含建筑物和大坝。GBSAR 系统可放在结构体的外面进行监测,但容易受其他分布信号的影响,且成本较高。GBSAR 系统对自然现象中的冰川和雪的监测还处于研究阶段,尤其是对雪覆盖的斜坡监测处于初期研究阶段,由于受大气的影响,仍存在一定的困难。总体来说,GBSAR 系统是一种有效的形变监测工具。

参考文献:

- [1] TARCHI D, RUDOLF H, LUZI G, et al. SAR interferometry for structural changes detection: a demonstration test on a dam[C]// Proc. IGARSS 1999. Hamburg, Germany: [s.n.], 1999: 1522–1524.
- [2] LEVA D, NICO G, TARCHI D, et al. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer[J]. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., 2003, 41(4): 745–752.
- [3] VENTISETTE C D, INTRIERI E, LUZI G, et al. Using ground based radar interferometry during emergency: the case of the A3 motorway (Calabria Region, Italy) threatened by a landslide[J]. Nat. Hazards & Earth Syst. Sci., 2011, 11(9): 2483–2495.
- [4] HONG Wen, TAN Weixian, WANG Yanping, et al. Development and experiments of ground-based SAR in IECAS for advanced SAR imaging technique validation[C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar. Aachen, Germany: [s.n.], 2010: 931–934.
- [5] ALBA M, BERNARDINI G, GIUSSANI A, et al. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques[C]// International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, China: [s.n.], 2008.
- [6] LUZI G, CROSETTO M, MONSERRAT O. Advanced techniques for dam monitoring[C]// Proc. II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation. Zaragoza, Spain: [s.n.], 2010: 23–25.
- [7] BROWM S, QUEGAN S, MORRISON K, et al. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval[J]. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., 2003, 41(7): 1602–1610.
- [8] ZHOU Z S, BOERNER W M, SATO M. Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for noninvasive ground-truth validation in vegetation monitoring[J]. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., 2004, 42(9): 1803–1810.
- [9] LEE H, LEE J H, KIM K E, et al. Development of a truck-mounted arc-scanning synthetic aperture radar[J]. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., 2014, 52(5): 2773–2779.
- [10] MetaSensing Company. FastGBSAR. [2015–07]. <http://www.metasensing.com/wp/index.php/products/fastgbsar/>.
- [11] IGLESIAS R, AGUASCA A, FABREGAS X, et al. Ground-Based Polarimetric SAR interferometry for the monitoring of terrain displacement phenomena—Part I: Theoretical Description[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing, 2015, 8(3): 980–993.
- [12] STROZZI T, WERNER C, WIESMANN A, et al. Topography mapping with a portable real-aperture radar interferometer[J]. IEEE Geosci. & Remote Sens. Lett., 2012, 9(2): 277–281.
- [13] VOYTENKO D, DIXON T H, WERNER C, et al. Monitoring a glacier in southeastern Iceland with the portable terrestrial radar interferometer[J]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2012, 53(60): 3230–3232.
- [14] LUKIN K, MOGYLA A, PALAMARCHUK V, et al. Monitoring of St. Sophia cathedral interior using Ka-band ground based noise waveform SAR[C]// Proc. 6th Radar Conference. Rome, Italy: [s.n.], 2009: 215–217.
- [15] IGLESIAS R, FABREGAS X, AGUASCA A, et al. Atmospheric phase screen compensation in ground-based SAR with a multiple-regression model over mountainous regions[J]. IEEE Trans. Geosci. & Remote Sens., 2014, 52(5): 2436–2449.
- [16] HERRERA G, FERNANDEZ-MERODO J A, MULAS J, et al. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the portalet case study[J]. Engineering Geology, 2013, 105(3/4): 220–230.