第33卷 第4期
2011年12月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 33 No. 4
Dec., 2011

综述

干涉雷达人工角反射器技术

赵俊娟[1]，李成范[1]，尹京苑[1]，张桂芳[2]，单新建[2]

(1. 上海大学计算机工程与科学学院，上海 200072；
2. 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室，北京 100029)

摘 要：人工角反射器是众多雷达目标中的典型散射结构。本文介绍了人工角反射器技术应用在雷达干涉测量(CD－InSAR)的基本概念，描述了其中常用的二面角、三角锥形三面角、正方体三面角和长方体锥形三面角等四种典型的人工角反射器特点和最大雷达散射截面的计算机模拟，最后对人工角反射器制作和布设中的一些注意事项及主要应用领域进行了探讨。

关键词：干涉雷达；角反射器；制作与架设

中图分类号：P227 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2011)04－0403－05

The Artificial Corner Reflector Technique in Interferometer Synthetic Aperture Radar

ZHAO Jun-juan[1], LI Cheng-fan[1], YIN Jing-yuan[1], ZHANG Gui-fang[2], SHAN Xin-jian[2]

(1. *School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai* 200072, *China*;
2. *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: Among many radar targets, artificial corner reflectors construction is a special kind of scatter construction. In this paper, the basic conceptions of artificial corner reflector technique in interferometer synthetic aperture radar (CR－InSAR) are introduced, the features of common used dihedral corner, triangular pyramidal trihedral corner, cubic trihedral corner and rectangle trihedral corner reflectors and their radar cross section (RCS) computer simulation are expetiated. Finally, the major area of application and some problems which are in the production and erection process of artificial corner reflectors are discussed.

Key words: **Interferometer synthetic aperture radar(InSAR); Corner reflector(CR); Production and erection**

0 引言

我国是地质灾害较为频繁的国家，地面沉降和滑坡是以地面形变为直接特征的典型地质灾害。从全国来看，传统的水准测量和GPS技术尚不能建立高效的地面沉降和滑坡监测体系。应用高新技术降低监测成本、提高监测工作的自动化程度成为缓变型地质灾害监测的一种现实需求[1]。自从1993年Massonnet等利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术成功地提取了1992年Landers地震(M=7.2)的形变场以来[2-3]，SAR干涉测量技术广泛应用于地球表面形变场探测领域，其中包括地面沉降、滑坡、地震和火山运动引起的地表位移等研究领

收稿日期：2010-04-18
基金项目：上海市科委项目上海地震科学数据共享平台建设(08DZ2292200)；国家科技支撑项目
作者简介：赵俊娟(1978－)，女(汉族)，上海人，博士，工程师，主要方向为：遥感与空间信息处理.
通讯作者：尹京苑，研究员，博士，博士生导师，E－mail: jyyin@staff.shu.edu.cn

域[4-7]，取得了很多重大的成果。近年来发展起来的合成孔径雷达差分干涉测量(D－InSAR)技术能以亚厘米级的精度获取地表形变信息，其得到的形变结果弥补了传统测量手段点位稀疏的缺点，具有大面积、快速、准确的优势。

虽然InSAR技术弥补了以往常规水准测量和GPS测量的不足，能够对地表进行大面积形变监测，但其局限性却也不容忽略，众多误差源的存在影响了相位测量的质量。这些误差源中，空间去相干和时间去相干造成的同名图像对的相干性下降现象受到了中外学者较多的关注[8]。空间去相干主要是由于覆盖同一观测区域的重轨图像对的基线距过长，即接近临界基线距或超过临界基线距，而造成相干性下降或不相干；时间去相干主要是由于在获取覆盖同一观测区域的重轨图像系列期间，地表地物的后向散射系数发生变化，从而导致相干性变差[9]。

从20世纪90年代中后期，一些学者开始尝试利用新技术来克服常规InSAR技术应用中的局限性，其中包括人工角反射器(CR)和永久散射体(PS) InSAR技术，简称CR－InSAR和PS－InSAR。PS技术主要用于研究地表长期变化，时间跨度较长，整幅图像相干性较差且只能研究相干性较好的PS点，但是对于地震断裂带和城市地表沉降区等重点区域，由于缺少合适的PS点，使得PS－InSAR很难发挥作用。而CR技术不仅关注大面积的地表沉降观测，而且更加关注重点目标微量形变监测，这就使得CR技术具有精度高、长期连续监测的优势。而且CR成本和架设角反射器的费用更加低廉，使得CR－InSAR具有更加广阔的应用前景[10-11]。

1 CR－InSAR技术

1.1 CR－InSAR的基本概念

从广义来说，一切能够产生角反射效应的物体都可以称之为角反射器。角反射效应是指：无论光线从哪一个方向入射，经过几次反射后都能将入射光线逆原方向反射回去。从CR－InSAR的基本概念上看，CR－InSAR技术与InSAR技术最大的不同是它需要在野外架设角反射器。

CR－InSAR是指通过预先在所关心的区域(ROI)架设一定数量尺寸、规格严格统一的人工角反射器。这些角反射器点(CR点)位置稳定(年位移量很小)，对雷达波反射很强，经过几年的时间后它们仍然保持着很高的相干性。于是在被监测地区所获取的有着较长时间间隔的或基线距较大的雷达影像都可以被利用上，而不必考虑时间变化因素。通过对每个监测目标进行时空分析，消除大气影响因素后便能精确地测量出目标的微量形变(3 mm量级)。

1.2 人工角反射器的形状

目前雷达遥感中所用到的人工角反射器(CR)主要特指那些利用导电性能和导磁性能良好，电容率大的铝材料做成几何形状规则，如二面角或三面角，表面为实体或网状的一种点状人工地物目标(图1)。这种角反射器因为几何形状规则，利用角反射效应将接收到的雷达波束经过几次反射后，形成很强的回波信号，在获得的SAR图像中形成很亮的星状亮斑，可以在雷达图像上被准确地识别出来。

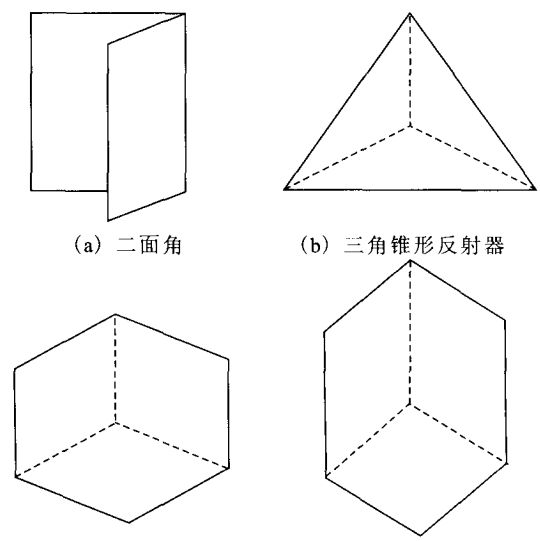


图1 常见的四种人工角反射器的几何形状

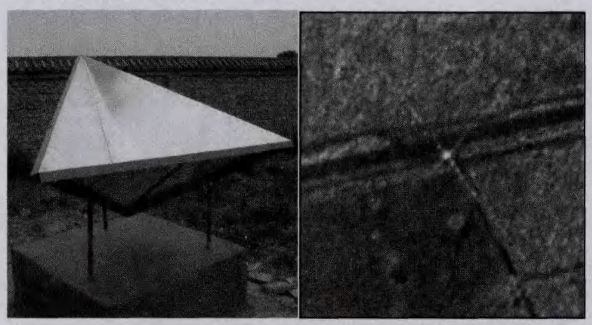
Fig. 1 Geometry of common artificial corner reflectors.

角反射器反射光线的原理，不同于一般的发生在媒质介面上的漫反射。二面角反射器是一种典型的散射结构，存在着较强的二次散射，其振幅相互叠加增强(图1(a))。三面角反射器是立方体角，实际相当于三块相互垂直或者是呈一定角度的平面镜(图1(b)、(c))。无论是二面角还是三角锥形反射器和正方体三角反射器通常的边长都是1 m×1 m的。对于长方体锥形反射器，为了减小对风的阻力，通常采用打孔的铝板来制作，由于有空的雷达散射截面有所降低，就需要增加侧面积，棱长由1 m×1 m增加到1 m×1.5 m(图1(d))。

1.3 人工角反射器的散射特性

雷达遥感中所用到的角反射器是指那些能够对雷达波束产生强烈反射，并且使雷达波束能够逆入

射方向反射回去的地物,包括自然地物和人工地物,在地物目标分类中属于硬目标,即狭义概念上的角反射器。人工角反射器因为几何形状规则,雷达散射截面(RCS)可以准确计算出来,所以最早被用于微波散射计的外定标中。这类地物在所获得的SAR 图像中形成很亮的星状亮斑,可以在雷达图像上被准确地识别出来,如图 2 所示。



(a)　　(b)

图 2　人工角反射器 CR(a)及解译图(b)

Fig. 2　Physical map and interpretation of CR.

1.4　雷达散射截面 RCS 特性计算机分析

雷达遥感中所使用的这些角反射器,即永久散射体和人工角反射器,在一个相对较长的时间间隔内,如 3～5 年的时间里,位置相对稳定,保持了很高的相干性。而且利用 GPS 可以精确地定出这些点的位置,所以在干涉测量中可以利用角反射器点来提高图像配准的精度,提高了长基线距和较长时间间隔图像对的利用率。正是因为角反射器具有精度高、稳定性好、相干性强的特点,所以被用来配合常规 InSAR 技术来提高监测的精度。

相比永久散射体,人工角反射器应用更为广泛。这是因为它具有标准的几何形状和严格的尺寸大小,其雷达截面是可以精确计算出来的。常见的人工角反射器形状主要有以下几种:二面角角反射器和三面角角反射器,其中三面角角反射器又可以分为单面形状为三角锥形和正方体形等。根据雷达最大散射截面计算公式(1)－(3)可模拟得到二面角、三角锥形反射器和正方体三角反射器的 *RCS* 模拟值[12-13],如图 3 所示。

$$\delta_{\max} = 8\pi\omega^2 h^2/\lambda^2 \tag{1}$$

$$\delta_{\max} = 4\pi l^4/(3\lambda^2) \tag{2}$$

$$\delta_{\max} = 12\pi l^4/\lambda^2 \tag{3}$$

式中,λ 为波长;h 和 l 为角反射器的边长,单位是 cm;ω 为载波频率,单位为 GHz;$\delta_{\max}$ 为雷达散射截面(*RCS*)的最大值,单位是 dBsm。

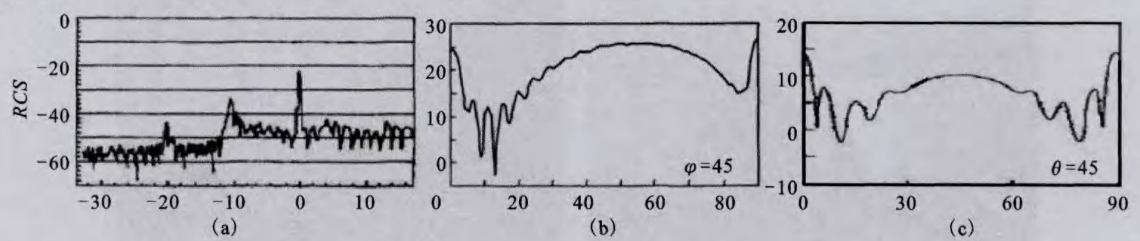


图 3　雷达散射截面 *RCS* 特性

Fig. 3　The curves of *RCS*.

2　人工角反射器制作与布设

在上述四种人工角反射器中,三角锥形反射器和长方体锥形反射器具有代表性,以下对其制作和布设过程进行简单介绍。

2.1　三角锥形反射器的制作

制作三角锥形反射锥时应注意以下几点:(1)三块反射板均是直角边为 1.2 m 长的等腰直角三角形,材质为 3 mm 厚的铝板;(2)三块反射板务必保持平整,两两之间严格垂直,误差小于 0.5°;(3)在与两个前支柱相连的反射板上,在其直角处打一直径 2 cm 的孔;(4)铝质反射锥的内表面务必整洁、光滑,不能有污渍、油漆等物;(5)为了加固和保护铝质三块反射板,还在每块反射板的外边镶以角铁。

在对支架的设计与制作上,还要保证以下几点:(1)三个支柱所用材料为圆钢,安装后三个支柱与底座垂直;(2)三个支柱中两根前支柱较短并且等长,另一根后支柱较长,通过调节后支柱与两根前支柱的长度差,需使反射锥最低反射板与底座所成二面角为 31°;(3)制作支柱的圆钢直径为 30 mm,保证反射器在野外不会因大风等因素而摇晃。

2.2　长方体锥形反射器的制作

为了使反射器对自然环境的适应能力更强,一般应用打孔的铝板来制作长方体锥形反射器,从而减小其对风的阻力,排除因雨雪而积水的可能,并降

低其自身重量。由于采用打孔铝板制作的长方体锥形反射器较之无孔长方体锥形反射器的雷达截面积有所降低，为了增大反射器两个侧面的面积，最终采用打孔铝板制作的长方体锥形反射器尺寸如图1(d)和图4所示，底面为1 m×1 m的正方形，侧面为1 m×1.5 m的长方形。

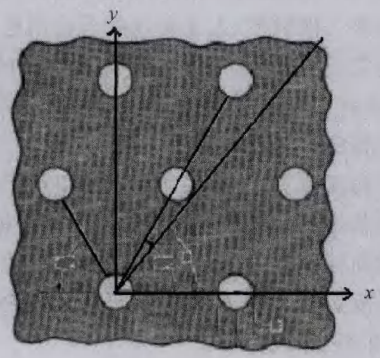


图4 ACCR反射面板打孔示意图

Fig. 4 Perforate chart of ACCR.

图4显示了在铝板上打孔效果，所采用的方案为：孔径10 mm；横向孔间距10 cm；竖向每行孔间距为8.67 cm，两行之间的孔排列呈正三角形。

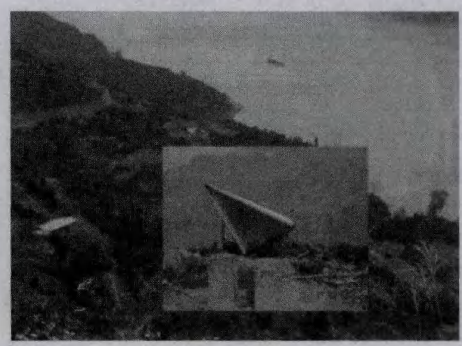
此外，三个反射面的背面用角铁加固，对两个垂直的长方形反射面之间及它们与底部正方形反射面之间的连接处也予以加固。

2.3 人工角反射器布设

经过野外实地踏勘，选定若干处具有代表性的CR点布设位置，这些位置能保证CR周围30 m左右没有对其干扰的强反射体。为了能使CR的位移能代表位移形变而不是表层松散土壤的形变，布设中用水泥墩将CR加以固定，尽可能使水泥墩的底部接触到基岩；但在基岩太深时，则确保水泥墩埋入地下的深度达到1 m。在地面以上，三角锥形反射器和长方体锥形反射器的支柱分别插入用砖围砌的水泥柱中，水泥柱与地下水泥墩为一体。三角锥形反射器和长方体锥形反射器的支柱埋入水泥柱的深度也达到40 cm。

根据所采用雷达的参数进行角度计算。例如，ENVISAT卫星的轨道倾角98.5°，CR点所处的纬度约为31°N，为了接收ASAR IS2模式的降轨数据，根据公式计算可知，三角锥形反射器底面斜边与南北向的夹角为北偏东10°，三角锥形反射器开口大致朝东，长方体锥形反射器底座直角边与正北方向夹角分别设为55°和35°，图5显示了布设现场三角锥形反射器和长方体锥形反射器的实景照片。

(a) 长方体锥形



(b) 三角锥形

图5 角反射器安装实景图

Fig. 5 Physical map of corner reflectors.

3 人工角反射器的应用现状

目前，利用人工角反射器技术进行地表沉降和滑坡监测等已进行了众多尝试，也取得了丰硕的成果。以与中石油勘探开发研究院合作项目“利用D-InSAR和CR-InSAR技术对西气东输管道工程靖边—临汾段子长县地区滑坡进行监测研究”[14]为例，首先收集研究区地质资料，通过野外实调和遥感解译确定研究区的地质构造和地质灾害情况，最终确定重点研究区域；然后基于对人工角反射器技术的研究成果，对人工角反射器后向散射特性及其与卫星过境当地入射角的关系进行探讨，确定人工角反射器的架设；最后收集SAR影像数据资料，通过干涉形变测量结算算法和相关模型实现影像数据处理。在实际应用中，人工角反射器弥补了自然界中永久散射体存在点位上面的不均衡现象，具有广阔的应用前景。

由于CR-InSAR技术在很大程度上解决了时间失相干因素和大气效应这两个难题，大大增强了

干涉测量的环境适应能力及其精度，所以人工角反射器技术已经获得了广泛应用，具有巨大的应用潜力。目前 CR 技术已广泛应用于空间失相关以及地形不稳定的区域的研究，特别是城市地区地质灾害监测研究等方面。另外在进行地壳形变观测时，CR 可安装在活动断层两侧，作为补充构成高精度骨干控制点的网络。

(1)精准地震监测

传统上主要利用大地水准测量和跨断层测量仪器来监测断层形变。近年来虽然采用高精度的 GPS 网测量来开展形变研究，但由于 GPS 网分布过于稀疏，很难反映断层的细微活动。但是通过 CR－InSAR 技术，在重点监测区域布设人工 CR 点，并与天然 PS 点相配合，从而构成高精度的监测网络，并由此获得大面积、高精度的地壳形变数据，从而指导研究人员来更加准确地分析断层的活动规律。

(2)城市地面沉降

世界上许多城市像威尼斯、上海、苏州等城市受到地面沉降的困扰。城市地区由于地表相干性较高有利于 CR 点选取。研究利用 InSAR 技术，补充以 PS－InSAR，利用长时间序列点目标分析高精度获取地表形变场，可应用于城市地面沉降的估算和预测。研究利用 CR－InSAR 技术构建地表沉降观测网的实用性、可行性和稳健性显得越来越重要，但是复杂的城市环境使得很多 CR 点不能够有效地识别出来，制约了 CR 技术在城市地表沉降监测中的应用。

总之，CR 技术因其全天候、稳定性、高测量精度等优势，必将成为地壳构造变形、地面沉降研究的新的强有力工具。相信随着越来越多的研究人员的关注和研究，CR 技术将会逐步走向成熟，并得到更为广泛的应用。

[参考文献]

[1] 范景辉. 基于相干目标的 D-InSAR 技术地表形变监测研究与应用[D]. 北京：中科院研究生院，2008.

[2] Massonet D. The displacement field of the Landers earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. Nature, 1993, 364: 138-142.

[3] 谌华. CRInSAR 大气校正模型研究及初步应用[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2006.

[4] 陈光保. GPS 技术监测地壳运动的新进展[J]. 西北地震学报，2009, 31(3): 302-310.

[5] 曾繁如，何政伟，李喆. MATLAB 软件与 ALOS 遥感影像在震害建筑物自动识别中的应用——以都江堰市区为例[J]. 西北地震学报，2009, 31(4): 327-332.

[6] 李稳，张元生，何斌. 地震波到时与视出射角联合定位方法研究[J]. 西北地震学报，2009, 31(3): 207-210.

[7] 王志勇，刘磊，周兴东. 利用合成孔径雷达差分干涉测量技术监测伊朗 Bam 地震同震形变场[J]. 西北地震学报，2008, 30(4): 310-316.

[8] Zebker H A, P A Rosen, S Hensley. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (B4): 7547-7563.

[9] Pulliainen J T. Backscattering properties of boreal forests at the C-and X-band[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1994, (32): 1041-1050.

[10] Ferretti A, C Prati, F Rocca. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39 (1): 8-20.

[11] Xia Y, Kaufmann H, Guo X F. Landslide monitoring in the Three Georges Area using D-InSAR and corner reflectors[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70 (10): 1167-1172.

[12] 韩明华，袁乃昌. 基于物理光学方法二面角反射器一维距离像特征信号计算[J]. 国防科技大学学报，1999, (5): 66-68.

[13] 范菊红，王月青. 二面角反射器的 RCS 特性分析[J]. 舰船电子工程，2006, 26(2): 148-150.

[14] 程滔. CR、PS 干涉形变测量联合解算算法研究与应用[D]. 北京：中国地震局地质研究所，2007.