

地震形变监测中人工角反射器的应用^{*}

赵俊娟¹, 尹京苑¹, 李成范¹, 单新建², 张桂芳²

(1. 上海大学 计算机工程与科学学院, 上海 200444; 2 中国地震局地质研究所, 北京 100029)

摘要: CR-InSAR 技术克服了常规 DInSAR 技术在时空上失相干的局限性, 在微形变监测中得到广泛应用。其中, 人工角反射器的合理布设是顺利实现 CR-InSAR 技术的基础。通过人工角反射器的科学布设, 可以实现人工角反射器的雷达散射截面最大化, 有利于其在 SAR 影像上的识别, 从而提高形变监测的精度。采用物理光学法对常用的几类人工角反射器的雷达散射截面进行了数值模拟, 其结果与理论值取得较好的一致性。雷达散射截面曲线的分析结果可以指导研究人员选择合适的角反射器类型, 以及如何在野外架设角反射器(主要包括方位角和入射角)。

关键词: 形变监测; 人工角反射器; 物理光学法; 雷达散射截面

中图分类号: P315.72+5; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)04-0034-06

0 引言

我国是地震灾害发生较为频繁的国家, 因此地震监测和预报是国家防震减灾的核心工作。地壳在地震发生前会产生各种各样的变形, 从而构成一个地壳形变场。对易发生地震的构造区域进行形变监测, 是近年来地震监测和预测的重要手段。

CR-InSAR (Corner Reflector Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术是随着 InSAR 技术的不断发展而产生的, 它能以毫米级的精度获取地表形变信息^[1]。通过在断层等易发生地震的形变重点监测区域架设一定数量尺寸和规格严格统一的人工角反射器, CR-InSAR 可实现大面积、长期性的连续高精度形变监测^[2-3]。关于 CR-InSAR 技术, 过往的研究多侧重于基于 CR 稳定点的形变量提取算法的改进, 而对人工角反射器本身的散射特性不做过多分析。事实上, 系统地研究人工角反射器的散射特点, 模拟反映人工角反射器散射特点的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)曲线是一项很有意义的工作: RCS 分析的结果可以帮助选择合适的角反射器类型; 指导如何在野外架设

角反射器(主要包括方位角和入射角); 人工角反射器达到最大 RCS 值时有利于其在 SAR 影像上的识别^[4], 提高形变监测的精度。鉴于这些认识, 本文把研究的焦点集中在人工角发射器的 RCS 模拟。

RCS 理论模拟方法众多^[5-7], 近年来又发展了快速多极化算子等改进算法。由于应用于 CR-InSAR 的人工角反射器属于电大尺寸目标, 所以本研究选择高频近似算法-物理光学法(Physical Optics, PO)对常用的几种人工角反射器(二面角、三角锥形三面角、矩形锥体三面角和正方形三面角)进行 RCS 曲线模拟, 分析 RCS 值在不同尺寸、形状和角度下的变化规律。

1 RCS 预估算法

雷达能检测、跟踪目标, 有时还能识别目标, 是因为存在回波信号。因此在设计和使用时, 能够定量或采用其他方式描述回波, 尤其是用目标的特性(如大小、形状和取向)来描述回波, 显得特别重要。目标问题可以归结为一个有效面积即雷达截面积^[8]。

物体的雷达散射截面是衡量雷达目标对于

* 收稿日期: 2013-02-22 修回日期: 2013-03-23

基金项目: 国家科技支撑项目“基于 InSAR 地震形变动态监测技术研究”(2008BAC35B04)

作者简介: 赵俊娟(1978-), 女, 上海人, 博士, 工程师, 主要方向为遥感与空间信息处理、数值模拟。

E-mail: junjuanzhao@shu.edu.cn

照射电磁波散射能力的一个物理量。目前, 已经发展了多种解析方法用于确定外形、尺寸和材料变化很宽的目标 RCS。这些方法大致可以分为两类: 精确方法和近似方法。精确方法用公式描述边值问题, 并利用满足合适的精确边界条件的波动方程的精确解来获得问题答案。然而, 在实际应用中, 我们感兴趣的问题很少能用精确方法求解。于是, 人们提出了大量近似而准确的方法来求解目标的 RCS。这些方法有时域的, 有频域的, 有混合的算法, 有高频的, 有低频的^[9-10]。

电大尺寸目标的 RCS 模拟常用物理光学法, 该理论适合于具有平板和单曲率表面特征的物体。物理光学法应用积分方程表达时, 遵循物理上合理的如下高频假设, 即由物体上某一点对该物体其它点的散射场贡献和入射场强相比是很小的。在散射体上某一给定点处, 由该物体其它部分散射的场(H^s)较之入射场(H^0)也是很小的。表面上每一点的总场为 $\vec{H} = \vec{H}^0 + \vec{H}^s$, 这里 \vec{H}^0 为人射场或外加场。因为 \vec{H}^s 不再出现在积分号内, 这就使其关于散射场的表达式大为简化。

$$\vec{H}^s(\vec{r}) = 2 \int (\hat{n} \times \vec{H}^0) \times \nabla \psi ds. \quad (1)$$

物理光学表面电流密度是 $J_{PO} = 2(\hat{n} \times \vec{H}^0)$, 式中: \hat{n} 是表面单位法线矢量, 因子 2 用以满足理想导电表面的边界条件。由入射场确定的表面切向场, 可看作散射场的电流源。式(1)的积分可以解释为表面上的各惠更斯子波的叠加, 其中格林函数的梯度 $\nabla \psi$ 则可粗略地解释为惠更斯子波。

2 人工角反射器的 RCS 模拟

2.1 人工角反射器

角反射器, 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。具有标准的几何形状和严格的尺寸大小的角反射器即所谓的人工角反射器。目前雷达遥感中所用到的人工角反射器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的点状人工地物目标, 它们通常为几何形状规则, 表面为实体或网状的一种。

常见的人工角反射器形状主要有图 1 所示的 4 种反射器。这类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。

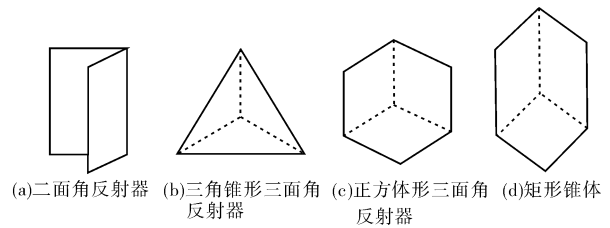


图 1 常见的 4 种人工角反射器的几何形状

2.2 基于 PO 的典型人工角反射器的 RCS 模拟

PO 算法模拟目标 RCS 的主要步骤有: ①建立目标的几何模型示意图; ②创建 RCS 公式; ③绘制目标 RCS 曲线。

2.2.1 二面角反射器

图 2 是二面角反射器的几何示意图, 其中 S_1 和 S_2 是二面角两平面, 边长为 b 高为 h , $b = h = 1 \text{ m}$, S_1 和 S_2 的夹角为 $2\beta(90^\circ)$, 入射角为 θ 。

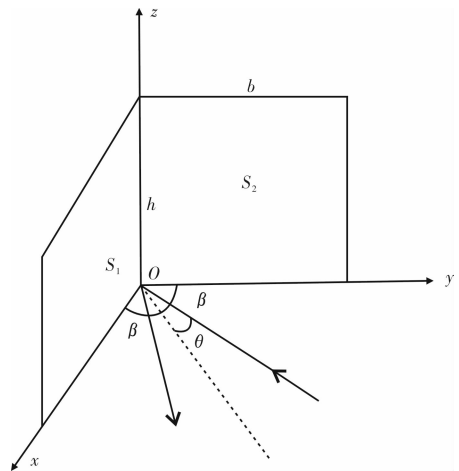


图 2 二面角几何示意图

二面角反射器总 RCS 计算公式为:

$$\delta = \frac{\lambda^2}{\pi} |S_1 + S_2 + S_3 + S_4|^2. \quad (2)$$

式中: δ 是总 RCS, λ 为波长, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别表示二面角两个平面以及两个平面相互之间的回波贡献。

利用 PO 方法计算 RCS, 可知 RCS 的平方根表达式为:

$$\sqrt{\delta} = -j \frac{\sqrt{\pi}}{k} \int_{S_1} \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \cdot e^{[jkb \cdot (\hat{i} - \hat{s})]} dS. \quad (3)$$

式中: j 为复数, 模为 1; $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波数; b 为边长, 积分表面 S_1 是物体的照明部分; \hat{i} 为入射波方向的单位矢量; \hat{s} 为散射方向的单位矢量; \hat{h}_i 为入射波极化的单位矢量; \hat{e}_r 为远场接收器

的单位矢量; \hat{n} 为平面表面法向单位矢量; \hat{h}_i 应该为入射磁场的单位矢量^[11-14]。

假设入射角 θ 满足 $-\beta \leq \theta \leq \beta$, β 为两个平面夹角的一半, c 为真空中的光速, 则利用式(3)可得:

$$S_1 = -jkb_1(h/\lambda) \sin(\beta + \theta) e^{-jkb_1 \cos(\beta + \theta)} \sin c[kb_1 \cos(\beta + \theta)], \quad (4)$$

$$S_2 = -jkb_2(h/\lambda) \sin(\beta - \theta) e^{-jkb_2 \cos(\beta - \theta)} \sin c[kb_2 \cos(\beta - \theta)], \quad (5)$$

$$S_3 = -jkb'_s(h/\lambda) \sin(3\beta + \alpha) e^{-jkb'_s \cos 2\beta \cos(\beta + \theta)} \sin c[kb'_s \cos 2\beta \cos(\beta + \theta)], \quad (6)$$

$$S_4 = -jkb'_s(h/\lambda) \sin(3\beta - \alpha) e^{-jkb'_s \cos 2\beta \cos(\beta - \theta)} \sin c[kb'_s \cos 2\beta \cos(\beta - \theta)]. \quad (7)$$

根据公式得到的 RCS 曲线(夹角为 90°)见图 3。

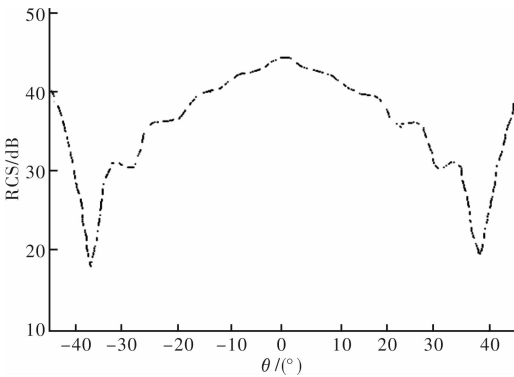


图3 二面角的 RCS 曲线

2.2.2 三角锥形三面角反射器

三面角角反射器的 RCS 研究较多^[15-20], 它相对稳固, 在野外不易变形, 是最常见的一种人工角发射器。如图 4 所示, 三角锥形三面角反射器边长尺寸 $L_x = L_y = L_z = 1$ m, 入射频率为 10 GHz。 θ 为入射角, φ 为方位角。为了便于计算 RCS, 我们采用入射角为 $\theta = 45^\circ$, 方位角 $\varphi \in (0^\circ \sim 90^\circ)$ 和方位角 $\varphi = 45^\circ$, 入射角 $\theta \in (0^\circ \sim 90^\circ)$, 利用物理光学方法分别计算方位角或入射角与 RCS 的关系。结果如图 5 所示。

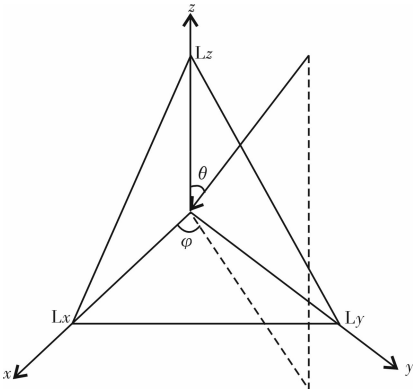


图4 三角锥形三面角几何示意图

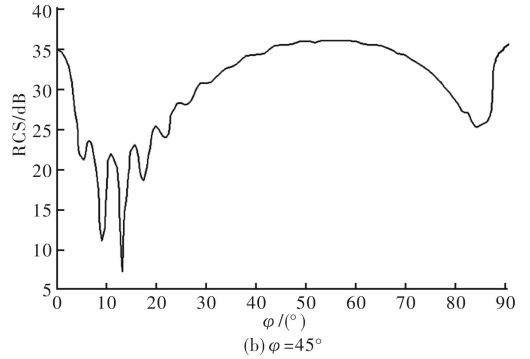
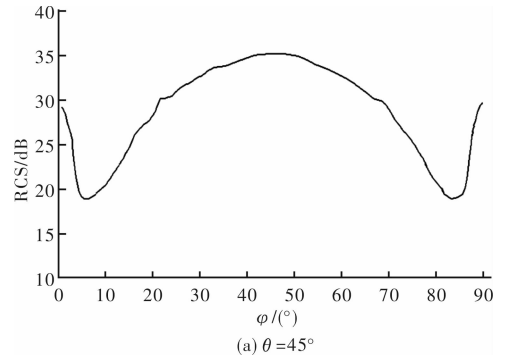


图5 三角锥形三面角反射器 RCS 曲线

2.2.3 矩形锥体三面角反射器 RCS 计算

矩形锥体三面角反射器也是由三块金属平板搭建而成。 xz 平面、 yz 平面和 xy 平面相互垂直, θ, ψ 在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 内变化。其中矩形锥体三面角反射器的两个侧面平板是相同的矩形, 底面为等腰直角三角形正方形金属平板。矩形锥体三面角反射器的几何模型如图 6 所示。

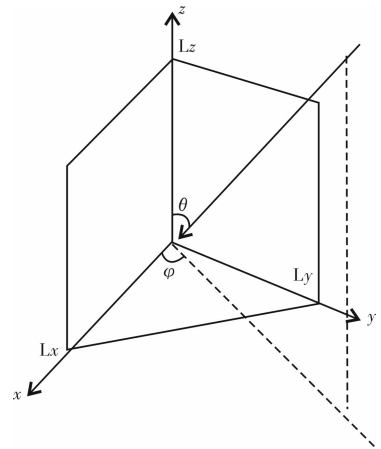


图6 矩形锥体三面角反射器的几何模型示意图

已知矩形锥体三面角反射器边长尺寸 $L_x = L_y = 1$ m, $L_z = 1.5$ m 入射频率为 10 GHz。从图 6 中可以看出, θ 为入射角, φ 为方位角, 由于矩形锥体三面角反射器几何结构的特殊性, 为了减小 RCS 计算量, 我们在研究中还是采用入射角 $\theta = 45^\circ$, 方位角 $\varphi \in (0^\circ \sim 90^\circ)$ 和方位角 $\varphi = 45^\circ$, 入射角 θ

$\in (0^\circ \sim 90^\circ)$, 利用物理光学方法分别计算方位角或入射角与 RCS 的关系。结果如图 7 所示。

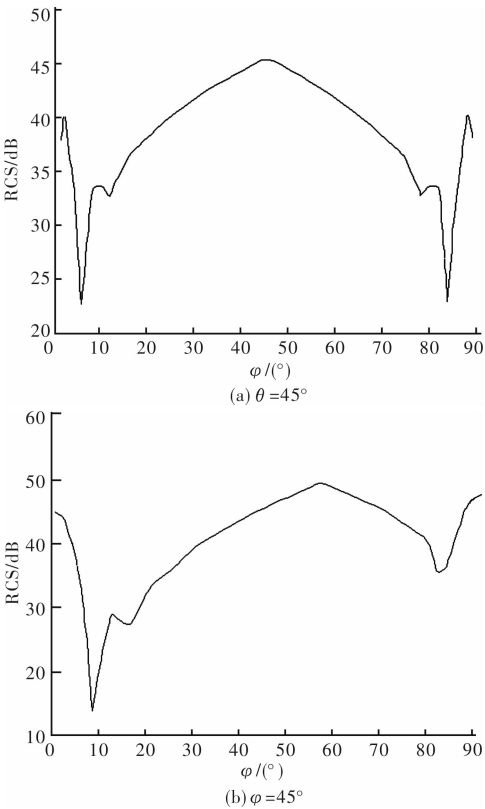


图 7 矩形锥体三面角反射器 RCS 曲线

从图 7 可以看出, 横轴表示角度变化范围, 纵轴表示 RCS 值变化范围。图 7(a) 中曲线表示当矩形锥体三面角反射器入射角 $\theta = 45^\circ$ 时, 方位角 φ 在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 范围内与 RCS 的关系; 图 7(b) 表示当矩形锥体三面角反射器方位角 $\varphi = 45^\circ$ 时, 入射角 θ 在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 范围内与 RCS 的关系; 随着入射角或方位角变化时, 矩形锥体三面角反射器 RCS 值变化较快; 与方位角变化相比, 当入射角变化时, 矩形锥体三面角反射器在中央主散射区具有更大的 RCS 值。

2.2.4 正方形三面角反射器 RCS 计算

正方形三面角反射器是由三块正方形金属平板相互正交而成, 角反射器边长 $L_x = L_y = L_z$ 。已知正方形三面角反射器边长尺寸 $L_x = L_y = L_z = 0.2\text{ m}$, 入射频率为 9.4 GHz , θ 为入射角, φ 为方位角。研究中首先对正方形三面角反射器进行建模, 模型如图 8 所示。

利用 PO 算法, 在 9.4 GHz 频率上计算了方位角 $\varphi = 45^\circ$, 入射角 φ 在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 范围内变化的 RCS; 然后计算入射角 $\theta = 45^\circ$, 方位角 φ 在 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 范围内变化的 RCS。结果如图 9 所示。

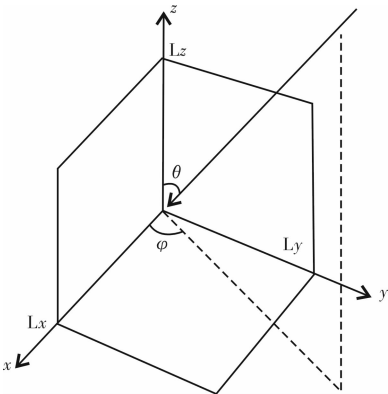


图 8 正方形三面角反射器的几何示意图

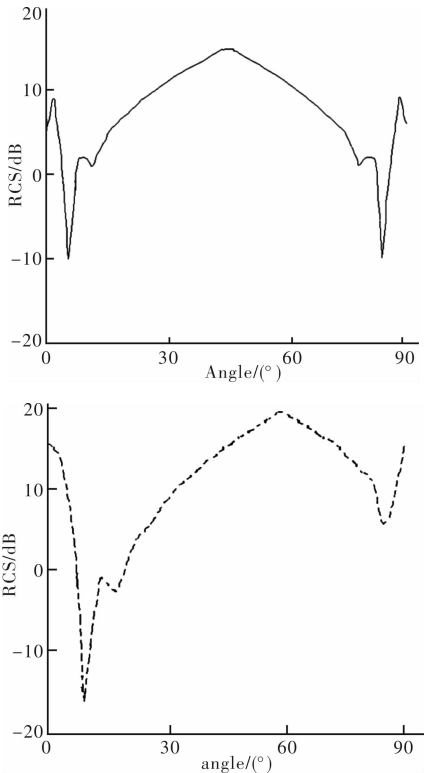


图 9 正方形三面角反射器 RCS 模拟曲线

3 人工角反射器的精确值和模拟值的比较

在工程上常用金属平板、二面角反射器、三面角反射器和龙伯球透镜反射器等作为标定的参照体。研究中通过与已知的几类角反射器的最大 RCS 公式计算的 RCS_{max} 值进行比较, 我们分析基于 PO 法模拟目标 RCS 的正确性, 从而肯定模拟结果的可靠及对试验场人工角反射器布设的指导价值。

几类角反射器的 RCS_{max} 计算公式如下:

二面角：
$$RCS_{\max} = \frac{8\pi a^2 b^2}{\lambda^2}。$$
(8)

三角锥形三面角：
$$RCS_{\max} = \frac{4\pi l^4}{3\lambda^2}。$$
(9)

正方体三面角：
$$RCS_{\max} = \frac{12\pi a^4}{\lambda^2}。$$
(10)

根据式(8)~式(10)计算四类角反射器的 RCS_{\max} ，同时把用 PO 法模拟得到的 RCS_{\max} 值进行比较,表中 RCS_{\max} 进行了对数处理,结果如表 1 所示。从表 1 中,我们可以看出 PO 法模拟的角反射器 RCS 取得了较好的结果,在精度上满足了实际工作的需要。

表 1 RCS_{\max} 的精确值和模拟值

角反射器类型	尺寸	RCS_{\max}/dB	$RCS_{\max}^{PO}/\text{dB}$
二面角反射器	$a=b=h=1\text{ m}$	44.45	45
三角锥形角反射器	$l=1\text{ m}$	36.67	36.5
矩形锥体角反射器	$L_x=L_y=1\text{ m},$ $L_z=1.5\text{ m}$	49.74	49.45
正方体三面角反射器	$L_x=L_y=$ $L_z=0.2\text{ m}$	17.97	17.89

4 讨论

人工角发射器在实际布设中既要考虑到 RCS 的最大化,又要顾及背景场的影响,这就需要对人工角反射器的适用性进行分析。

地物的后向散射特性一方面决定于雷达参数,例如频率、极化、入射角和方位角等,另一方面受地表参数影响(如湿度、粗糙度和、介电常数等因素),即背景场。裸地和草地的散射机制是面散射,而农田、森林和城区的后向散射以体散射为主。影响裸地和草地散射系数的地面参数主要是表面粗糙度和土壤介电常数。农作物或其它稀疏的低矮植被产生中等程度的体散射,有三种重要的散射机理:地面漫散射、不同植物部

位的直接(单次反射)散射、植物和地面之间的二次反射。森林的散射是一种复杂的体散射,其中较为主要的五种散射包括:树干和地面之间的二次散射,在地面覆盖水的条件下,这种散射会产生很强的回波;树冠的直接后向散射;树冠中的多次散射;地面漫散射;树冠在地面或在树冠其它部位的阴影。城区建筑物可以形成角发射器效应。

表 2 所示为不同地形类型散射截面的每平方米平均 RCS 测量值,除城区以外,每平方米平均 RCS 的测量值都在 -20 dB 以下。这里 C 波段下角反射器背景都以 -20 分贝来计算形变监测的标准差。

表 2 不同地形类型散射截面的每平方米平均 RCS 的测量值

RCS 的测量值						dB
地形类型	沙漠	耕地	户外森林	有树林的小山	小建筑物	城市
X-band	-26	-20	-23	-25	-23	-15

角反射器形变监测视线向形变标准差可用下面的公式表示:

$$\sigma_{los} = \frac{\lambda}{4 \cdot \pi} \sqrt{\frac{1}{2 \cdot SCR}} = \frac{\lambda}{4 \sqrt{2} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{RCS_{\text{background}}}{RCS_{\text{reflector}}}}。$$

(13)

式中: σ_{los} 为形变测量标准差; λ 为波长; $SCR = \frac{RCS_{\text{reflector}}}{RCS_{\text{background}}}$ 。

根据角反射器形变监测视线向形变标准差计算公式,计算出了试验区几种角反射器的视线向形变标准差,表 3 中的标准数据显示出,试验区的几种角反射器视线向形变标准差比较接近,如果不考虑其他误差因素的影响,都可以达到亚毫米级的形变监测精度。

通过 RCS 模拟,我们可以取得如下认识:二面角 RCS 随入射角变化很快,只在很小的入射角范围内才能保证取得较大的 RCS 值。而在实际安装过程中,很难将角反射器的朝向调得十分精确,

表 3 不同类型角反射器特征对比(C 波段)

类型	CR 尺寸	最大 RCS 值	有效反射率/ (dB/m ²)	有效反射面 面积/m ²	实测 RCS 均值	σ_{los}
二面角	1 m × 1 m	39.04	19.52	1.414	7.82	0.42
三角锥	1 m × 1 m	31.26	20.84	1.225	9.33	0.36
三角锥	1.2 m × 1.2 m	34.42	15.93	1.463	10.91	0.36
正方体形三面角	1 m × 1 m	40.80	13.6	2.450	14.7	0.41

同时雷达信号的入射角也会有偏移,使得实际 RCS 波动范围较大,所以二面角反射器使用得较少;三角锥形三面角反射器和正方形三面角反射器对雷达入射角和方位角的容忍度更高,但比较而言三角锥形三面角反射器结构更为稳定的特点,所以在实际应用中使用较多。通过角反射器视线向形变标准差比较可知,边长为 1 m 的三角锥形三面角反射器,在不考虑大气误差等影响的情况下,测量精度就能达到亚毫米级,所以角反射器没必要做的很大。

论文得到的这些结果在京西北试验区架设人工角发射器时进行实践检验,有关的研究结果另撰文阐述。

参考文献:

- [1] 王超,张红,刘智,等. 基于 D-InSAR 的 1993-1995 年苏州市地面沉降监测[J]. 地球物理学报, 2002, 45(Supp 1): 244-253.
- [2] 袁礼海,葛家龙,江凯,等. SAR 辐射定标精度设计与分析[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(1): 35-39.
- [3] 张婷,张鹏飞,曾琪明. SAR 定标中角反射器的研究[J]. 遥感信息, 2010(3): 38-43.
- [4] Sakurai-Amano T Kobayashi, Fujii S N. Detection of singular corner reflectors in residential and mountainous areas from SAR images[C]// IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Hamburg, Germany, 1999, 2: 1454-1456.
- [5] Uluşık Ç, Çakır G, Çakır M, et al. Radar cross section (RCS) modeling and simulation; Part I-Definitions, strategies, and canonical examples[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Feb, 2008, 50(1): 115-126.
- [6] 孟敏,聂在平. 超大电尺寸目标的物理光学高效算法分析[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(5): 507-510.
- [7] Che Jing, Tang Shuo. RCS analysis of hypersonic cruise vehicle [J]. Journal of Astronautics, 2007, 8(1): 227-232.
- [8] Ling H, Lee S W, Chou R. High-frequency RCS of open cavities with rectangular and circular cross sections [J]. IEEE Trans on AP, 1989, 37(5): 648-654.
- [9] Crispin J W Jr, Maffett A L. RCS estimation for simple shape [J]. Proceedings of The IEEE, 1965, 53(8): 833-848.
- [10] Çakır G, Çakır M, Sevgi L. Radar cross section (RCS) modeling and simulation; Part II-A novel FDTD-based RCS prediction virtual tool [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2008, 50(2): 81-94.
- [11] 周力行. 二面角反射器的 RCS 预估[J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 1997, 12(3): 276-279.
- [12] 刘松华; 郭立新. 电大目标 RCS 的高频计算方法[J]. 微波学报, 2010(Supp 1): 105-108.
- [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] Richards M A, Trott, K D. A physical optics approximation to the range profile signature of a dihedral corner reflector [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1995, 37(3): 478-481.
- [15] Polycia ipou A C, Balannis C A. A new approach to improve RCS patterns of trihedral corner reflectors [J]. IEEE, 2009, 3: 2299-2301.
- [16] Youssef Nazih N. RCS of complex targets [M]. Proceedings of The IEEE, 1989, 77(5): 722-734.
- [17] 方重华,赵晓楠,刘倩. 改进的物理光学法分析远场目标的电磁散射特性[J]. 微波学报, 2008(4): 118-121.
- [18] 时振栋,唐璞,刘宏伟,等. 基本散射体 RCS 的分析和综合[J]. 应用科学学报, 2003, 21(4): 331-333.
- [19] 吴先良. 三面角反射器多次散射图形电磁计算[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2000, 24(3): 85-91.
- [20] 薛洪新,沈卫东,刘选俊,等. 强散射体的 RCS 分析[J]. 光电技术应用, 2008, 23(4): 14-17.

Application of Artificial Corner Reflector in Earthquake Deformation Monitoring

Zhao Junjuan¹, Yin Jingyuan¹, Li Chengfan¹, Shan Xinjian² and Zhang Guifang²

(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: Temporal and geometric decorrelation is the most important factors in differential interferometry synthetic aperture radar. In order to overcome this limitation, the CR-InSAR develops and is applied more broadly in micro-deformation monitoring. The well-off implementation of CR-InSAR needs proper layout of artificial corner reflector as base. When radar cross section (RCS) of artificial corner reflector achieves maximum, it is easier to recognize CR from SAR and increase monitoring accuracy. In view of the understanding, the paper is focusing on the simulation method to RCS of common corner reflectors with physical optics (PO), and the result is compared with theoretical value, good agreement is obtained. The results of the analysis RCS can help choose the right type of corner reflector and provide guidance on how to set up CR in the fields (mainly including azimuth and incident angle).

Key words: deformation monitoring; artificial corner reflector; physical optics; radar cross section