

## 圆柱型油罐 SAR 图像的多径散射特征 和几何参数提取

张月婷<sup>1,2,3</sup>, 陈红珍<sup>1,2,3</sup>, 丁赤彪<sup>2,4</sup>, 王宏琦<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100190;

4. 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:**结合多径散射理论和雷达成像原理, 针对圆柱型固定顶油罐和浮动顶油罐的 SAR 图像的多径散射提出了一种预测模型, 该预测模型建立了多径散射机制引起的图像上的近似聚焦位置、强度与油罐、雷达相关参数的关系。同时, 结合仿真实验和 Terra-SAR 图像验证了该模型的有效性, 分析了油罐目标的多径特征, 并针对 Terra-SAR 图像利用基于模型的方法有效提取了油罐目标的几何参数。结果和分析表明, 该方法比传统的方法在精度、稳定性上均有所提高。

**关键词:**油罐; SAR 图像; 多径散射; 几何参数提取

**中图分类号:** TN959 **文献标识码:** A

## The multi-path scattering characteristics and the geometry extraction of cylinder tanks in SAR image

ZHANG Yue-Ting<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hong-Zhen<sup>1,2,3</sup>, DING Chi-Biao<sup>2,4</sup>, WANG Hong-Qi<sup>2,3</sup>

(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing

and Application System, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Combining scattering theory and principle of SAR, a novel prediction model is proposed based on the multi-path scattering characteristics in the SAR image of cylinder tanks, for both the fixed and the floating top styles. The model can provide the relationship between the geometry parameters of the tank, the SAR parameters, the approximated position, and the scattering strength of the bright region in the SAR image. The validity of this model is proved by analyzing the Terra-SAR data and simulation experiments. Furthermore, geometry extraction is successfully implemented on the Terra-SAR data. The results show that the model is better than traditional methods in precision and stability.

**Key words:** cylinder tanks; SAR image; multi-path scattering; geometry extraction

**PACS:** 84.40.xb

### 引言

不同地区的油罐通常都具有圆柱型结构, 这样的结构特点使得研究油罐目标的 SAR 图像散射特征具有较通用的应用价值。

油罐目标的 SAR 图像和它的光学图像有较大的区别, 光学图像中油罐目标有规则的圆周外形, 而在雷达图像中油罐的圆周轮廓断断续续, 并且, 油罐目标的散射中心的分布与油罐的几何形状存在着较大的差别。针对识别问题, SAR 图像油罐目标的自

收稿日期: 2011-07-26, 修回日期: 2012-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(40701110)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (40701110)

作者简介 (Biography): 张月婷 (1983-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事 SAR 图像理解及雷达目标散射特性领域的研究。E-mail: zhangyueting06@mails.gucas.ac.cn

Received date: 2011-07-26, revised date: 2012-03-06

动识别多数是采用同光学图像相同的识别方法,虚警率较高<sup>[1]</sup>.有效的自动识别和充分挖掘油罐目标 SAR 图像的有效信息的关键是对共 SAR 图像的充分理解.

近年来,SAR 图像仿真逐渐成为研究散射特征的主要手段之一<sup>[2-5]</sup>.2010 年,文献[6]首次从散射机制的角度对 SAR 图像中的油罐目标开展了研究,该文献根据几何关系指出了油罐 SAR 图像中明亮弧线与油罐目标直接散射和多次散射机制的对应关系,在对油罐目标的 SAR 图像理解上取得了有效的成果.然而,文献[6]直观地认为油罐目标的多径散射在图像中产生的弧线与油罐底部的实际圆形边界完全重合.本文针对油罐目标 SAR 图像分析研究的过程中发现,油罐目标与地面多径散射产生的弧线区域实际包含了很多细节,并且,首次注意到了油罐目标 SAR 图像中明亮的弧线并不都是呈现与油罐半径相同的曲率这一新的现象,属于同一油罐的明亮弧线具有不同的曲率半径,如图 1 所示.在同一油罐区域,图 1(a)中过 E 点圆弧的曲率半径不等于过 G 点圆弧的曲率半径;图 1(b)中过 E 点圆弧的曲率半径不等于过 M 点圆弧的半径.

针对这种现象开展了研究,提出了一种针对 SAR 图像中油罐目标的多径散射的预测模型,该模型可以有效地解释这种现象,同时,该模型建立了多径散射的特征与油罐尺寸、雷达参数的相互关系.在研究中,将仿真实验和针对 Terra-SAR 数据的试验相结合,验证了模型的有效性,同时有效反演了油罐目标的几何参数,反演精度和稳定性,均优于文献[6]所代表的传统方法.

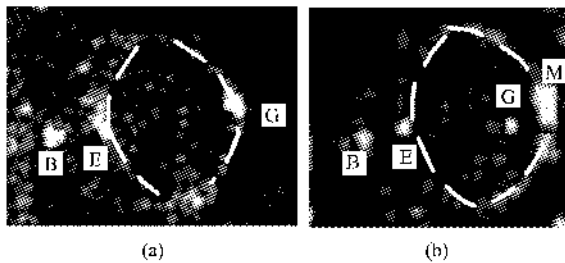


图 1 圆柱油罐的 Terra-SAR 聚束模式图像 (a) 固定顶油罐, (b) 浮顶油罐  
Fig. 1 The Terra-SAR image of the cylinder tank with spotlight mode (a) the tank with fixed top, (b) the tank with floating top

### 1 油罐目标多径散射特征的预测模型

针对油罐目标两种典型的多径散射机制,根据

射线原理和 SAR 工作原理给出它们的预测模型.

油罐目标的多径散射主要有两种情况:1)油罐竖直外壁与地面的二次散射;2)浮动顶油罐竖直内壁与浮动罐顶的二次散射.前者在固定顶油罐和浮顶油罐的 SAR 成像过程中都会产生;后者主要在浮顶油罐的浮顶具有一定浮动量时产生.浮顶油罐中的某条典型的二次散射射线如图 2 所示.这条射线依次经过点  $P_1$  至  $P_4$  然后返回雷达接收端,其中,点  $P_2$  处于油罐内壁弧面,点  $P_3$  处于浮顶结构所在平面内.

首先考察多径散射在图像上的表现轮廓.为了研究轮廓特征,需要获得多径散射在 SAR 图像上聚焦的位置.

根据射线理论<sup>[7]</sup>,射线循迹根据镜面反射原理进行计算.一条普适情况下的多径散射线如图 3 所示,该条射线到达目标表面 A 点后经过多径散射从目标表面的 B 点弹出.令  $\eta$  表示方位向慢时间, $v$  表示雷达飞行速度, $R_{MB}$  表示多径散射的路程.根据文献[8],该条射线的距离等式为

$$R(\eta) = R_A(\eta) + R_B(\eta) + R_{MB}(\eta). \quad (1)$$

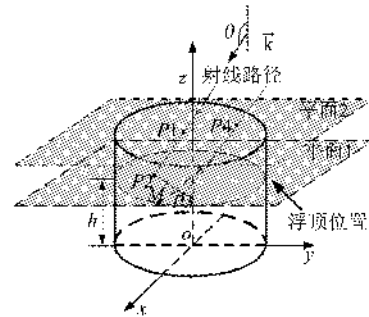


图 2 浮顶圆柱油罐的多径散射示意图  
Fig. 2 The multi-path ray trace for a tank with floating top

多普勒频率为

$$f_d = \frac{2v_r^2}{\lambda} \left[ \frac{(\eta - \eta_A)}{\sqrt{R_A^2 + v_r(\eta - \eta_A)^2}} - \frac{(\eta - \eta_B)}{\sqrt{R_B^2 + v_r(\eta - \eta_B)^2}} \right] - \frac{2}{\lambda} \frac{dR_{MB}(\eta)}{d\eta}. \quad (2)$$

式(2)的  $\frac{dR_{MB}(\eta)}{d\eta}$  项与具体的多径散射情况有关,多径路径越复杂,该项数值越大.在这里,由于油罐目标形状比较规则,该项近似为零,由此可以推出方位向的聚焦位置为

$$\eta' = \frac{R_A \eta_B + R_B \eta_A}{R_A + R_B}. \quad (3)$$

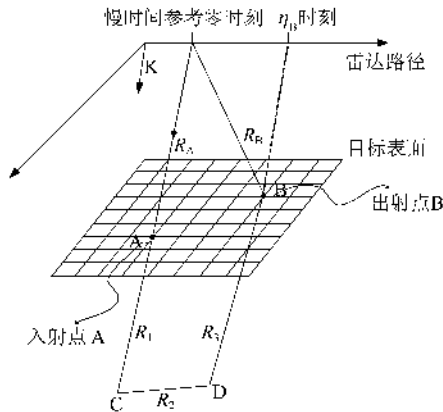


图3 合成孔径过程中的多径散射示意图  
Fig. 3 Sketch for the multi-path during the synthetic process

考虑到雷达与目标的距离远远大于目标的尺寸,近似有  $R_A/R_B \approx 1$ ,式(3)可以化简为

$$\eta' = \frac{\eta_A + \eta_B}{2} \quad (4)$$

距离向聚焦位置同样近似为

$$R = \frac{1}{2}(R_A^0 + R_B^0 + R_{\text{ant}}), \quad (5)$$

其中,  $R_A^0$  和  $R_B^0$  分别表示点 A 和 B 点的最短斜距。

式(4)和式(5)表达了一般形式的多径散射射线在 SAR 图像上的聚焦位置,下面分析竖直面与水平面的二次散射机制。

图4示意了竖直平面与水平平面的多径散射机制。如图所示,竖直平面结构单元的大小为  $W \times H$ ,雷达入射角为  $\theta$ ,平面朝向角为  $\alpha$ ,多径散射线经过 A, B 两点后返回雷达,根据弹射线原理<sup>7</sup>,令 A 点坐标为  $[x_A, y_A, z_A]$ ,则 B 点坐标为:

$$\begin{cases} x_B = x_A - z_A \tan\theta \cos 2\alpha \\ y_B = y_A - z_A \tan\theta \sin 2\alpha \\ z_B = 0 \end{cases} \quad (6)$$

以点为参考点,该条射线的距离向路程为

$$l = \sum_{i=1}^3 l_i, \quad (7)$$

其中,

$$l_1 = x_A \sin\theta - z_A \cos\theta, \quad (8)$$

$$l_2 = \sqrt{z_A^2 \tan^2\theta \cos^2 2\alpha + z_A^2 \tan^2\theta \sin^2 2\alpha + z_A^2}, \quad (9)$$

$$l_3 = x_A \sin\theta - z_A \tan\theta \cos 2\alpha \sin\theta. \quad (10)$$

化简式(7)有

$$l = 2x_A \sin\theta + \frac{z_A \sin^2\theta(1 - \cos 2\alpha)}{\cos\theta}. \quad (11)$$

根据式(5),该条射线的方位向聚焦位置为

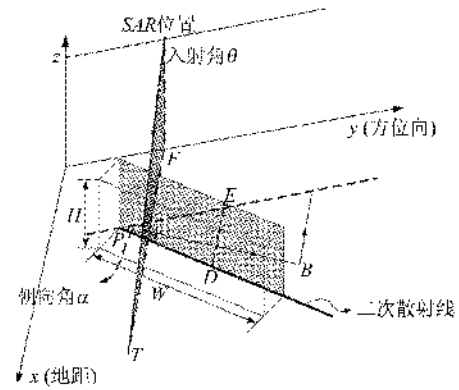


图4 竖直结构的二次散射示意图  
Fig. 4 Sketch for the double scattering happened between the vertical plane and the ground

$$P_a = y_a + \frac{1}{2}z_a \tan\theta \sin 2\alpha. \quad (12)$$

为了获得射线组聚焦位置的特征,下面将分析聚焦在等方位向的射线组的特性.考察方位向聚焦位置为 P 的射线组,它们满足的几何关系为

$$P = y_A + \frac{1}{2}z_A \tan\theta \sin 2\alpha = y + \frac{1}{2}z \tan\theta \sin 2\alpha. \quad (13)$$

同时,该射线组均与竖直面相交,因此有

$$-x \cos\alpha + y \sin\alpha. \quad (14)$$

根据式(12)、式(14)和式(5),方位向聚焦位置为 P 的射线组的距离向路程为

$$l = 2P \tan\alpha \sin\beta, \quad (15)$$

对应的地距为

$$l_w = P \tan\alpha. \quad (16)$$

观察式(16)发现,等方位向的射线组在距离向的聚焦位置只与方位向位置 P 和竖直面朝向角  $\alpha$  有关.这说明,竖直面与水平面的二次散射机制近似在 SAR 图像上产生一条直线,并且,该直线的位置与墙向墙角线重合.文献[9]是少数明确提及该结论的文献之一,但该文献没有讨论朝向角不为 0 的情况,也没有考虑合成孔径的过程.本文给出了一般朝向角情况下二次散射线的证明。

继续推导二次散射线段的端点的位置.根据式(13),图5虚线示意了具有相同方位向的射线组与竖直面交点的特征,它们是一组平行的具有负斜率的直线,直线的斜率可以求出如下

$$\tan\phi = \frac{\cot\theta}{\sin\alpha}. \quad (17)$$

于是,可以求得二次散射线的长度为

$$L = h \tan\theta \sin\alpha + w. \quad (18)$$

式(18)表明,二次散射线的长度在朝向角不等

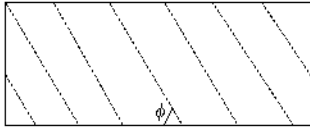


图5 图像中等方位向射线在竖直面的轨迹  
Fig. 5 The loci in the vertical plane belongs to the rays which have the same azimuth in the image

于零的情况下大于实际墙角结构的长度. 这个结论与文献[3]分析的现象一致, 说明了此处分析过程的有效性. 同时, 二次散射线长度与竖直面的高度, 宽度, 朝向角和雷达入射角有关.

在如图4所示的情况下, 弹出射线与入射线的夹角为

$$\gamma = \cos^{-1}(\cos^2\theta\sin^2\alpha + \sin^2\theta). \quad (19)$$

本文根据物理光学法近似认为每条射线贡献的散射强度与上面所求夹角的余弦值成正比, 此外, 根据文献[10], 针对粗糙表面, 假设像素单元内的散射体相位均匀分布, 则每个像素单元的强度值为

$$I = \sum_{k=1}^N \sigma_k. \quad (20)$$

至此, 建立了竖直散射结构与水平面的多径散射特征模型, 下面将利用微分的思想分析油罐目标的多径散射. 油罐弧面壁的微分过程如图6所示, 其中, 左图对应油罐外壁发生多径散射时的俯视情况, 此时, 电磁波从右侧照射; 右图示意了油罐内壁发生多径散射时的俯视情况, 此时, 电磁波从左侧照射.

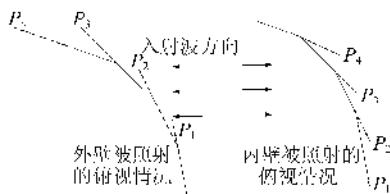


图6 离散的圆弧内壁和外壁的二次散射线的轨迹示意图  
Fig. 6 Sketch for the double scattering of the outside wall and the inner wall with discrete planes

根据式(16)和(18), 外壁发生多径时, 二次散射线的端点  $P_i$  的坐标为

$$\begin{cases} P_x = r \cos\varphi_n - rh' \tan\theta \tan\varphi_n \sin\varphi_n \\ P_y = r \sin\varphi_n + rh' \tan\theta \tan\varphi_n \cos\varphi_n \end{cases} \quad (21)$$

内壁发生多径时, 对应的二次散射线端点坐标为

$$\begin{cases} P_x = r \cos\varphi_n + rh' \tan\theta \tan\varphi_n \sin\varphi_n \\ P_y = r \sin\varphi_n - rh' \tan\theta \tan\varphi_n \cos\varphi_n \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $r$  为油罐目标的半径,  $h'$  分别对应油罐高度、浮顶浮动距离.

根据以上分析, 式(19)~(22)建立了油罐目标多径散射在 SAR 图像中的预测模型.

对于浮动顶油罐来说, 当浮顶浮动距离与半径、入射角满足一定关系时, 浮顶、罐壁之间会产生三次散射, 三次散射聚焦区域在距离向大于二次散射, 且散射强度较弱.

## 2 基于预测模型的油罐多径散射特征的分析 and 几何参数的提取

首先对多径散射区域在图像上显示的轮廓特征进行了分析. 根据建立的预测模型, 图7示意了两种典型多径散射在图像上近似聚焦的位置与实际油罐目标所处位置的对比, 仿真时选取油罐高度与半径的比值为1, 波束入射角  $40^\circ$ , 图7中距离向和方位向所表示的数值是被半径归一化的距离数值.

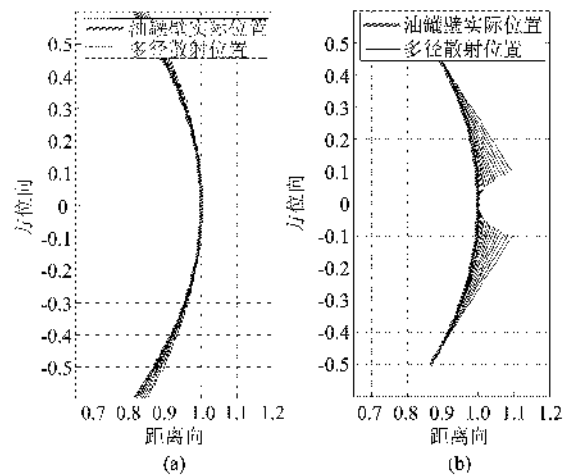


图7 预测模型得到的多径散射聚焦位置的结果 (a) 外壁的多径散射, (b) 内壁的多径散射  
Fig. 7 the focus position of the multi-path scattering in the image based on the prediction model (a) for the outside wall of the tank, (b) for the inner wall of the tank

图8给出了印度维沙卡帕特南地区某区域的 Terra-SAR 图像及其光学图像, 其中 Terra-SAR 图像的波束入射角  $42^\circ$ , 像素间隔 0.5 m.

图9给出了固定顶油罐和浮顶油罐的多径散射特征示意图. 根据以上分析, 圆柱油罐多径散射特征主要有: 1) 固定顶油罐通常在 SAR 图像上显示三条弧线, 它们各自对应的位置如图9所示, 多径散射对应的弧线的曲率半径大于油罐半径; 2) 浮顶油罐通常在 SAR 图像上显示四条弧线. 外壁底部多径散射对应的弧线曲率半径大于油罐半径, 油罐内侧多

径效应对应的弧线显示出更大的半径. 图 9 中所示的几何点 B、E、G、M 在实际 SAR 图像中的位置如图 1 所示.

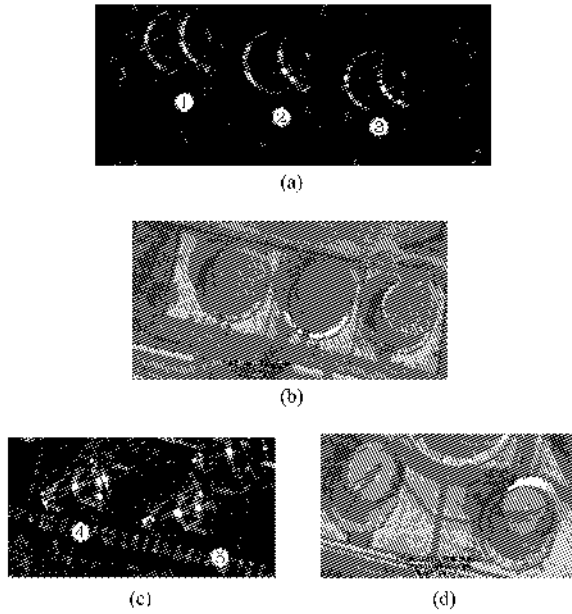


图 8 油罐目标图像 (a) 固定顶油罐 Terra-SAR 图像<sup>[11]</sup>, (b) 与(a) 相同区域的光学图像<sup>[12]</sup>, (c) 浮顶油罐 Terra-SAR 图像<sup>[11]</sup>, (d) 与(c) 相同区域的光学图像<sup>[12]</sup>  
Fig. 8 The images of the cylinder tanks, (a) The Terra-SAR image of the tanks with fixed top<sup>[11]</sup>, (b) the optical image of the same region as (a)<sup>[12]</sup>, (c) the Terra-SAR image of the tanks with floating top<sup>[11]</sup>, (d) the optical image of the same region as (c)<sup>[12]</sup>.

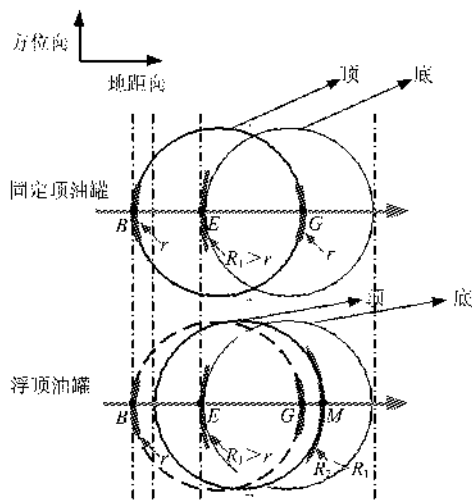


图 9 固定顶油罐和浮顶油罐的多径散射特征示意图  
Fig. 9 Sketch for the characteristics of the multi-path scattering about the cylinder tanks in the SAR image, including the tank with fixed top and the tank with floating top

图 10 给出了基于半径不同的圆弧线散射模型, 并利用最小均方准则提取圆弧线的实验结果. 在图 10(b)中, 直接散射圆弧的检测过程受到了二次散射圆弧的干扰导致漏检. 此外, 基于提出的预测模型, 根据各自弧线的半径参数, 可以通过以下关系获取油罐目标的高度:

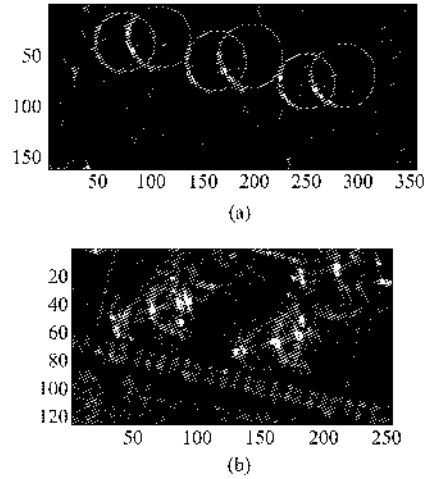


图 10 油罐 Terra-SAR 图像弧线检测结果 (a) 固定顶油罐, (b) 浮动顶油罐  
Fig. 10 Detection results for the arcs in the Terra-SAR image of the cylinder tanks (a) the tanks with fixed top, (b) the tanks with floating top

$$h = \{ [X_0 - x_0 - (R_1 \cos\alpha - r \cos\alpha)]^2 + [Y_0 - y_0 - (R_1 \sin\alpha - r \sin\alpha)]^2 \}^{\frac{1}{2}} \tan\theta, \quad (23)$$

其中,  $r$  和  $R_1$  分别对应直接散射弧线和外壁弧线的半径,  $[x_0, y_0]$  为直接散射弧线的圆心坐标,  $[X_0, Y_0]$  为外壁弧线的圆心坐标. 表 1 给出了图 8 所示的 5 个油罐的几何参数提取结果. 由于无法实地考察, 表 1 的参考值为利用 Google Earth 图像测量的结果, 从误差的数量级可以看出, 在参考尺寸下, 该组实验结果的误差约在 1 个像素数量级, 优于文献[6]. 此外, 文献[6]参数提取过程仅利用了整个油罐成像区域中某两个点的位置信息, 而本文的方法是利用多个点位置的估计以得到最优的模型参数, 根据相干斑产生的邻域相关模型<sup>[10]</sup>, 本文方法的稳定性优于文献[6]所给方法, 与表 1 所示的实验结果相符合.

### 3 结论

在对油罐目标 SAR 图像的研究过程中, 首次注意到同一油罐对应的不同弧线呈现出不同的曲率半

表 1 油罐几何参数反演结果

Table 1 Geometry extraction results for the tanks

油罐号	半径			高度		
	测量值/m	参考值/m	误差/m	测量值/m	参考值/m	误差/m
1	14.5	15.0	0.5	15.0	15.5	0.5
2	14.5	15.0	0.5	14.1	14.0	0.1
3	13.5	14.0	0.5	14.2	14.0	0.2
4	8.6	8.8	0.2	14.4	14.5	0.1
5	8.2	9.0	0.8	13.9	14.5	0.6

径. 经研究表明, 这样的现象是由多径散射和雷达特有的合成孔径过程造成的. 同时, 根据多径散射机制和 SAR 工作原理首次建立了油罐目标的多径散射特征的预测模型, 有效分析和表征了圆柱型油罐的 SAR 图像的多径散射特征, 并基于该模型, 给出了油罐几何参数的反演方法, 反演精度和稳定性均比传统方法有所提高. 仿真实验和基于 Terra-SAR 数据的实验验证了本文研究的有效性.

本文虽然只讨论了油罐目标的多径散射特征, 但本文建立预测模型中使用的: 基于射线和合成孔径原理的分析方法可以有效的推广, 它为具有确定性多径散射机制的目标在 SAR 图像上的多径散射特征的分析提供了一种有效的分析途径.

REFERENCES

[1] XIA Xin. Study of feature extraction and recognition of typical targets in SAR images [D]. *Master Dissertation of Si-*

*chuan University*(夏昕. SAR 图像典型目标特征提取与识别方法研究. 四川大学硕士学位论文), 2006. 5.

[2] Xu F, Jin Y Q. Imaging simulation of polarimetric SAR for a comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm[J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2006, **44**(11): 3219-3234.

[3] Auer S, Hinz S, Bamler R. Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(3): 1445-1456.

[4] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D. A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, **40**(2): 1787-1801.

[5] Guida R, Iodice A, Riccio D. Height retrieval of isolated buildings from single high-resolution SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(7): 2967-2979.

[6] Guida R, Iodice A, Riccio D. Assessment of TerraSAR-X products with a new feature extraction application: monitoring of cylindrical tanks[J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2010, **48**(2): 930-938.

[7] Ling H, Chou R, Lee S W. Shooting and bouncing rays: calculating RCS of an arbitrary cavity [J]. *IEEE Trans. AP*, 1989, **37**(2): 194-205.

[8] Cumming I G, Wong F H. *Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation* [M]. London, Artech House, 2005.

[9] Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, et al. SAR raw signal simulation for urban structures [J]. *IEEE Geosci. Remote Sens.*, 2003, **41**(9): 1986-1995.

[10] Oliver C, Quegan S. *Understanding synthetic aperture radar images* [M]. SciTech Publishing Inc, 2004.

[11] <http://www.infoterra.com> [URI]

[12] <http://www.google.com/earth/index.html> [URL]

(上接第 324 页)

[5] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, WANG Yu-Hua, et al. The calibration method for water vapor channel of scanning-radiometer carried by FY-2B satellite [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 王玉花, 等. 风云二号 B 星星载扫描辐射计水汽通道定标方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(5): 357-360.

[6] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-Guo, et al. Absolute radiometric calibration of FY-2C infrared split-window channels by using sea buoy data and ncep reanalysis data [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张勇, 李元, 戎志国, 等. 利用大洋浮标数据和 NCEP 再分析资料对 FY-2C 红外分裂窗通道的绝对辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(3): 188-193.

[7] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng-Min, et al. On-orbit radiometric calibration of FengYun geostationary meteorological satellite's infrared channels based on sea-surface measurements in the south China sea [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (戎志国, 张玉香, 贾凤敏, 等. 利用南海水面开展我国静止气象卫星红外通道在轨辐射定标.

*红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 97-101.

[8] TANG Jun-Wu, GU Xing-Fa, NIU Sheng-Li, et al. Water target based cross-calibration of CBERS-02 CCD camera with MODIS data [J]. *Science in China (E)*. (唐军武, 顾行发, 牛生丽, 等. 基于水体目标的 CBERS-02 卫星 CCD 相机与 MODIS 的交叉辐射定标. *中国科学 (E 辑)*), 2005, **35**(S1): 59-69

[9] Wan Z M, Zhang Y L, Li Z L, et al. Preliminary estimate of calibration of the moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared data using Lake Titicaca [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **80**(3): 497-515.

[10] Alice I, Salomonson V. *MODIS Level 1B Data Dictionary* [M]. MCST; MODIS Characterization Support Team For NASA/Goddard Space Flight Center Green belt, 2003.

[11] RONG Zhi-Guo, ZHANG Yu-Xiang, JIA Feng, et al. Intercalibration of FY-2B IR channel with NOAA satellites. *Acta Meteorologica* (戎志国, 张玉香, 陆风, 等. FY-2B 与 NOAA 卫星红外通道的相对定标. *气象学报*), 2005, **63**(4): 485-492.