

高分辨率 SAR 图像桥梁目标仿真与特性分析

张月婷^{*①②} 仇晓兰^{①②} 丁赤彪^① 雷斌^{①②} 付琨^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(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)

摘要: 该文针对多径散射特征,给出了一种高分辨率 SAR 图像的仿真与特性分析方法,以桥梁目标为例开展了分析,该仿真方法从 SAR 工作原理出发,利用几何光学法计算和分析桥梁目标的单次散射情况和多径散射情况,并根据雷达工作原理和成像机理利用散射数据获得仿真 SAR 图像。文中选择了悉尼大桥为研究对象,利用分辨率为 1 m 的 Terra-SAR 数据开展了实验,仿真获得的 SAR 图像与实际 SAR 图像的主要散射特征一致,验证了方法的有效性;同时,根据仿真算法的分析过程,文中给出了悉尼大桥 SAR 图像主要散射特征的细节解释。实验表明,该方法能够有效获得目标的多径散射特征,同时能够有效辅助目标的 SAR 图像理解工作。

关键词: 高分辨率 SAR 图像;多径散射;SAR 图像解译;散射机理分析

中图分类号: TN959.1+7

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2015)01-0078-06

DOI: 10.12000/JR14139

引用格式: 张月婷,仇晓兰,丁赤彪,等. 高分辨率 SAR 图像桥梁目标仿真与特性分析[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 78-83. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14139>.

Reference format: Zhang Yue-ting, Qiu Xiao-lan, Ding Chi-biao, et al. The simulation and characteristics analysis on high resolution SAR images of bridges[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 78-83. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14139>.

The Simulation and Characteristics Analysis on High Resolution SAR Images of Bridges

Zhang Yue-ting^{①②} Qiu Xiao-lan^{①②} Ding Chi-biao^① Lei Bin^{①②} Fu Kun^{①②}

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*Key Laboratory of Spatial Information Processing and Application System Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: An approach for simulation and analysis on the high resolution Synthetic Aperture Radar (SAR) images is provided and bridges are chosen for analysis. According to the principle of SAR, the Geometry Optics (GO) is employed to calculate the direct scatterings and multi-path scatterings of the bridge in this approach. In this study, the Sydney Bridge is chosen for analysis, and the Terra-SAR data with 1 m resolution is used. The results show that, the main properties of the bridge with the simulation and the real data are consistent, which tests the validity of the approach. Furthermore, according to the simulation process, the main scattering characteristics of the SAR image of the Sydney Bridge are interpreted. The experiments show that this approach can provide the main scattering characteristics of the target, and also show that it can be helpful for SAR images interpretations.

Key words: High resolution SAR images; Multi-path scattering; SAR image interpretation; Scattering mechanisms analysis

1 引言

随着合成孔径雷达(SAR)图像分辨率的提高, SAR 图像包含的目标信息越来越丰富。在 1 m 分

辨率及更高分辨率量级下,很多人造目标,例如:建筑物、桥梁、车辆等目标的图像散射区域均具有细节特征^[1-5]。理解图像的这些细节特征的散射机理,建立图像特征与目标属性参数之间的关系是 SAR 图像信息有效利用的关键,只有建立了图像特征与目标之间的关系,才能高效地完成目标参数提取、目标识别等工作,而 SAR 图像仿真是建立目

2014-11-20 收到, 2015-03-11 改回

国家自然科学基金(61401429)资助课题

*通信作者: 张月婷 zhangyueting06@mails.gucas.ac.cn

在目标的诸多特征中，多径散射特征是一类重要的目标特征，高分辨率 SAR 图像的人造目标的多径散射特征的理解对于参数提取有重要意义^[6-8]。本文将桥梁目标为例开展，围绕多径散射特征开展仿真和分析工作。

针对桥梁目标 SAR 图像的研究，已有的文献多侧重于基于直线检测的桥梁目标识别。本文针对高分辨率 SAR 图像，旨在理解细节特征，给出一种仿真方法，并基于该方法给出特征分析结果。经研究，由于单次散射和多径散射的原因，桥梁目标在图像上多呈现为多条明亮两线^[9,10]，针对这些亮线特征的分析是桥梁目标仿真及特征理解的关键，本着这样的想法，本文方法从 SAR 工作原理出发，选择利用几何光学法和物理光学法计算桥梁目标本身的单次散射及桥梁目标同水面之间的多次散射，同时结合雷达成像原理获得桥梁目标的仿真图像。同时，在仿真的基础上，给出细节特征的理解。

本文的章节安排如下：第2节将给出仿真方法，并开展仿真实验，给出仿真结果。第3节将在第2节基础上讨论和分析桥梁目标的主要散射特征。第4节将给出本文的研究结论。

2 仿真及特性分析

2.1 仿真与多径散射特征分析方法

SAR 图像仿真是目标特征理解的手段，如图1所示，主要有物理建模、散射数据计算、图像构建3个步骤^[4]。

目标的电磁散射情况主要由目标本身参数(包括背景参数)和雷达观测参数决定，一方面，目标本身参数主要包括目标复介电常数和目标几何形状(及背景的这两项参数)，目标的复介电常数与目标的材质、涂敷等众多因素相关，不同的天气条件、不同的季节会或多或少会影响目标的复介电常数，

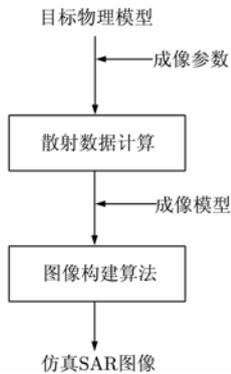


图1 仿真方法流程图

Fig. 1 The flow charts of the simulation approach

并且目标不同的局部对应各自不同的复介电常数。另一方面，雷达观测参数主要有：频率、观测角度。基于以上的分析，完全符合实际情况的仿真参数是无法获得的，一方面，目标包括背景的所有几何细节无法精确量测，另一方面，目标表面对应的3维复介电常数也无法全部精确获得。因此，仿真方法均是实际情况的近似，仿真方法是否有效在于该方法能否有效辅助目标识别和解译工作。

本着这样的想法，本文旨在提出一种仿真方法，旨在通过该方法，理解桥梁目标的主要散射特征对应的产生机理，因此，本文暂不考虑目标的材质信息。将目标考虑为金属匀质目标，水面利用平面建模。

根据桥梁目标多径散射特征明显的特点，本文采用了以下的仿真方法，具体步骤如下：

(1) 物理建模

考虑到桥梁目标与水面的多径散射作用明显，在物理建模步骤中，主要针对桥梁目标的桥体、吊桥等主要组成部分完成桥梁目标的建模，还需要建立水面的模型，本文近似地利用平面建立水面的模型，在此基础上，将建立的模型利用三角面元离散化以实现后续的散射计算过程。

(2) 散射计算

桥梁目标与水面的多径散射显现明显，几何光学法(Geometry Optics, GO)能够有效模拟多径散射机制，但不能处理非镜面反射情况，物理光学法(Physical Optics, PO)可以处理非镜面反射情况，因此在本文的仿真过程将综合利用这两个方法。

具体的步骤如下：

(a) 设置初始射线组；

(b) 计算面元法向量 \hat{n} ，以此计算每条射线的弹射路径，实现射线跟踪，其中，散射线方向为：

$$\hat{s} = \hat{i} - 2(\hat{i} \cdot \hat{n}) \quad (1)$$

其中， \hat{n} 为目标表面 r' 处的单位法矢量， \hat{i}, \hat{s} 分别为电磁波入射方向和散射方向的方向矢量。

(c) 利用 PO 计算射线最后弹出目标的散射强度，根据 PO，散射强度可以通过式(2)计算：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E}^s &= \frac{jk}{4\pi r} \int_S \hat{s} \times (\mathbf{M}_s + \eta_0 \hat{s} \times \mathbf{J}_s) \exp[jkr'(\hat{s} - \hat{i})] ds' \\ \mathbf{H}^s &= -\frac{jk}{4\pi r} \int_S \hat{s} \times \left(\mathbf{J}_s - \frac{1}{\eta_0} \hat{s} \times \mathbf{M}_s \right) \exp[jkr'(\hat{s} - \hat{i})] ds' \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中， \mathbf{E}^s 和 \mathbf{H}^s 表示 r' 处的散射场，S表示目标表面被照明的部分。

值得注意的是,由于多径散射机制,在计算多径散射时,要考虑目标的细节结构可能导致的不同散射方向,具体到桥梁目标中:桥体底部的某些细节结构会产生多个方向的散射,因此,在具体的计算过程中,要考虑桥体底部的非镜面反射方向与水面镜面反射方向产生的散射线的相互作用。

(3) 图像构建

图像构建过程是利用计算得到的散射数据获得 SAR 图像的过程,在目前的仿真算法中,图像构建的方法主要有两类:2 维频域的方法和时域的方法,频域法计算过程复杂,误差传递情况不清楚,时域法在辅助目标散射特征机理理解方面有优势,只是传统方法没有考虑合成孔径因素的影响,本文将合成孔径因素近似的考虑在其中,改进了时域的图像构建方法。

在具体的实现过程中,由于多径散射机制的存在,某些射线首次与目标相交的入射位置和最后弹射出目标的位置是两个不同的点位置,下面将计算最后的聚焦位置:图 2 示意了一条多径散射线:该射线到达目标表面 A 点,经过多径散射从 B 点弹出。

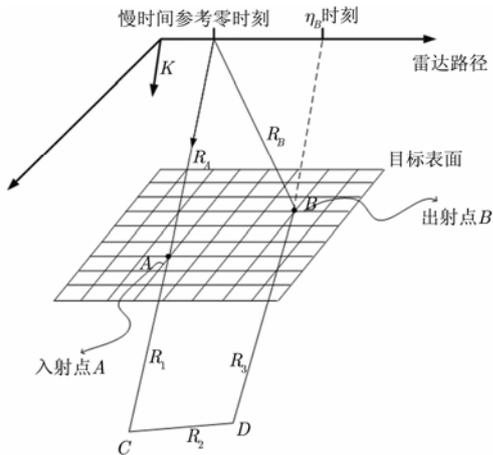


图 2 合成孔径过程中的多径散射示意图

Fig. 2 The sketch for the multi-path during the synthetic process

令 η 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。这里需要计算该条射线近似的聚焦位置,推导过程为:考察多径过程在回波中产生的相位项,计算多径过程对应的多普勒频率,根据 SAR 成像算法^[11],计算压缩后的线性相位项以确定目标的近似聚焦位置。根据文献[11,12]和文献[4],多普勒频率可推导求得:

$$f_d = -\frac{2v_r^2}{\lambda} \left[\frac{(\eta - \eta_A)}{\sqrt{R_A^2 + v_r(\eta - \eta_A)^2}} - \frac{(\eta - \eta_B)}{\sqrt{R_B^2 + v_r(\eta - \eta_B)^2}} \right] - \frac{2}{\lambda} \frac{dR_{MB}(\eta)}{d\eta} \quad (3)$$

其中, $(dR_{MB}(\eta))/(d\eta)$ 项与具体的多径散射情况有关,目标场景越复杂,多径路径越复杂,该项数值

越大。考虑到雷达与目标的距离远远大于目标尺寸,近似有: $R_A/R_B \approx 1$, 近似聚焦位置为:

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

式(4)给出了多径路径较为规则的情况下,多径散射射线方位向的近似聚焦位置。此外,在图像构建过程中,假设在合成孔径角度内、在雷达波段范围内目标散射情况近似不变,利用雷达波束中心视角、中心工作频率下的目标散射情况获得仿真 SAR 图像。最后在仿真 SAR 图像获得的基础上,需要将仿真图像与实际图像进行比对,并针对散射特征给出产生机理,开展特性分析。

2.2 实验及分析

本文选择了悉尼港大桥为研究对象,图 3 给出了桥梁的照片^[13],可以看出,悉尼大桥的特征较明显,金属构架且具有弧形拱结构,本小节将利用 2.1 节所述的仿真方法针对该目标开展仿真,并将仿真结果与实际 Terra-SAR 数据开展比对分析,解释桥梁 SAR 图像的主要细节特征。



图 3 悉尼港大桥^[13]

Fig. 3 The photo of the Sydney Harbor Bridge^[13]

首先给出仿真过程的参数设置。其中，桥梁的基本尺寸为：宽 49 m，高 59 m。在物理建模过程中，利用三角面元的方法针对桥梁目标进行了近似建模，考虑了桥体、桥拱、竖直和倾斜的桥索结构，在散射计算过程中，计算了单次散射及桥梁和水面之间的多径散射，图像构建方面，本文采用了文献[11]提出的基于射线的 SAR 图像构建方法，假设该目标在合成孔径角度内散射情况近似不变，利用中心频率和波束中心视角下的散射情况近似模拟

SAR 图像。雷达基本参数为：中心频率 9.6 GHz，入射角度为 19°，分辨率为 1 m。

仿真结果如下图 4 所示，图 4 给出了分辨率为 1 m 的 Terra-SAR 数据^[1]和仿真获得的 SAR 图像，其中，实际数据是将不同时间重访状态下的数据叠加伪彩色显示图。对比二者可以看出，仿真获得的 SAR 图像与实际 SAR 图像的基本特征基本一致，这从一定程度上验证了本文方法的有效性。

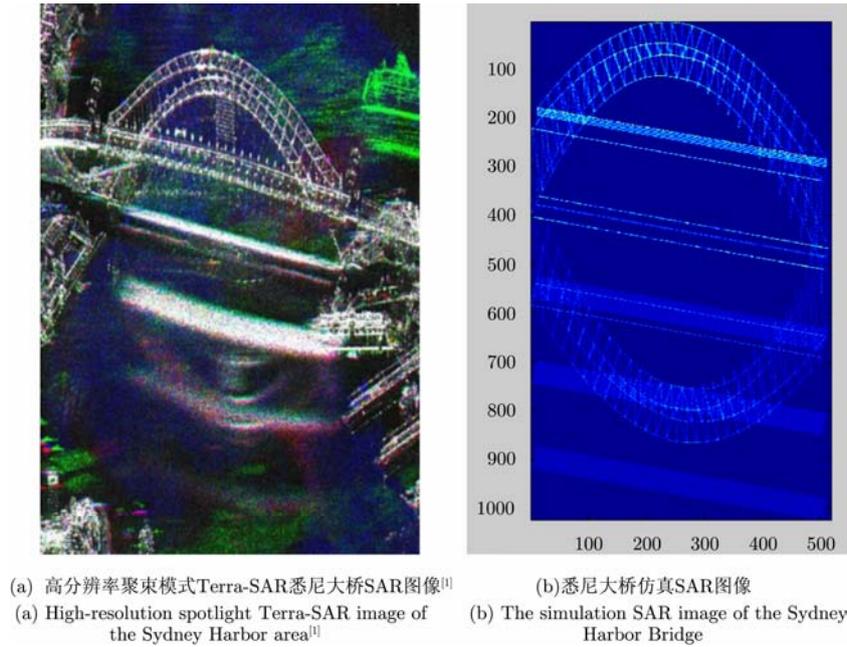


图 4 SAR 图像与仿真图像的对比

Fig. 4 The comparison between SAR image and the simulated image

3 特性分析

图 5 给出了解译标注的示意图，如图 5 所示，S1, S2 对应桥体两侧的单次散射，可以通过测量 S1 和 S2 之间的间隔近似得到桥梁的宽度；S3 和 S4 对应桥梁与水面相互作用而产生的 2 次散射机制，值得注意的是，桥拱与水面、桥体与水面的 2 次散射机制均对应相同的图像区域，由于雷达的入射方向的原因使得 S3 的散射强度要明显大于 S4 的散射强度；S5 是 3 次散射产生的亮线，它对应桥体底面与水面相互作用而产生的 3 次散射机制；S6 是 5 次散射产生的亮线，它对应桥体底面与水面的 5 次散射机制；S7 对应桥体底面与水面的 7 次散射机制。其中，S5, S6, S7 这 3 条亮线依赖于水面的波浪大小，当水面波浪较大时，通常观察不到这 3 条亮线。在图像中隐约可以看到弧线 A1 和 A2，通过仿真获知，弧线亮线 A1 和 A2 对应桥拱与水面的 3 次散射机制。以上是通过仿真过程解译得到了细节

信息的理解结果。此外，根据提出的方法，可以预测该目标其它入射角度的 SAR 图像，例如，图 6 给出了入射角度为 60°时的仿真图像。

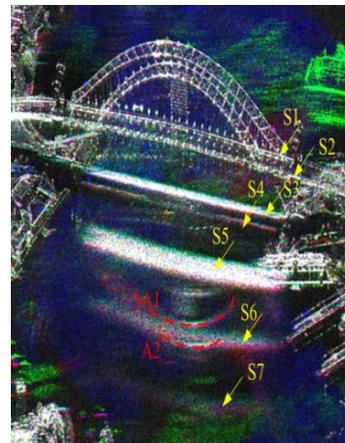


图 5 桥梁解译标注示意图

Fig. 5 The interpretation sketch of the bridge

以上是针对悉尼大桥的目标特性分析,一般而言,桥梁目标在 SAR 图像上的线特征显著,单次散射、2 次散射、3 次散射对应的线特征通常会稳定地出现在图像中,图 7(a)和图 7(b)分别给出了旧金山地区两座桥梁的 Terra-SAR 图像,该图的分辨率为方位向 6.59 m,距离向 1.84 m,入射角度为 39° ,雷达工作频率 9.6 GHz,入射方向对应图像

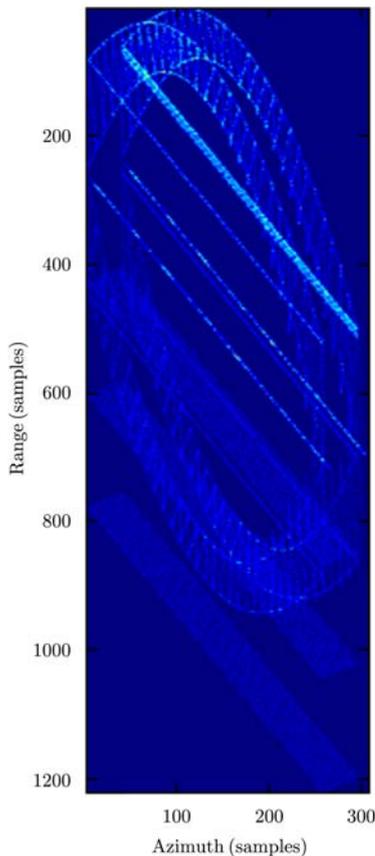


图 6 仿真 SAR 图像(入射角度 60°)

Fig. 6 The simulation SAR image for with incident angle of 60°

的由上至下。可以看出,3 条明亮的线特征明显,并且,3 次散射对应的亮线由于多径散射的原因出现了模糊,这些现象均与悉尼大桥的特征保持一致,有所不同的是,5 次,7 次散射对应的线特征在图像上没有显现,可以预测成像时的海面具有一定的波浪,使得高次的多径散射变得很弱以至无法观测。此外,从图 7(a)可以看出,部分桥梁吊索的 3 次散射特征呈现在图像上,但该段吊索的直接散射特征确没有出现,因此吊索的朝向和细节结构对图像特征产生了很大的影响。实际上,桥梁目标的散射特征与图像的极化方式也有很大关联。总之,根据研究经验,桥梁目标对应桥体的单次、2 次、3 次散射的线特征通常会稳定地出现在图像上,这个特点对桥梁目标的检测与参数反演应用具有积极的意义。

4 结论

本文给出了一种高分辨率 SAR 图像仿真方法,该方法旨在分析目标的多径散射机制,同时选择了桥梁目标开展了讨论,该方法利用雷达中心频率、中心视角下的散射近似表征合成孔径角度内目标的散射,综合利用几何光学法和物理光学法计算桥梁的散射机理,并考虑桥梁与水面的多径散射机制。在实验方面,选择了悉尼大桥为对象开展了仿真,利用分辨率为 1 m 的 Terra-SAR 数据进行了对比分析,实验结果验证了方法的有效性,同时文中基于仿真过程给出了悉尼大桥高分辨率 SAR 图像细节特征的解释,并总结了桥梁目标 SAR 图像的主要特征。实验分析结果从某种程度上表明该方法能够有效仿真目标的多径散射机制,辅助 SAR 图像中目标的解译工作。

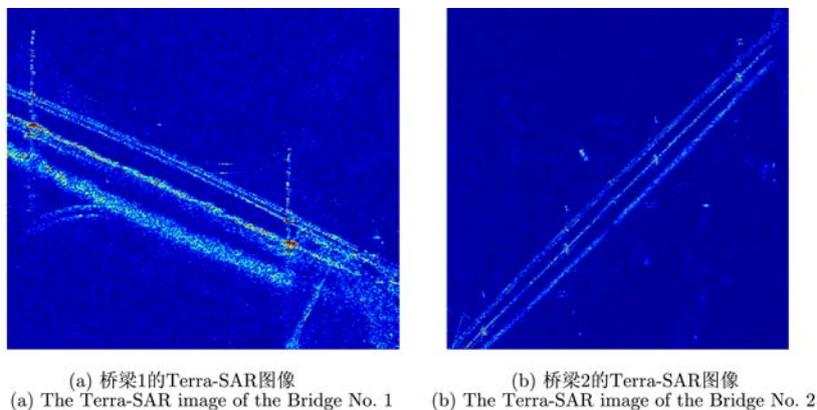


图 7 旧金山地区两座桥梁目标的 Terra-SAR 图像

Fig. 7 The Terra-SAR images of two bridges in San Francisco

参 考 文 献

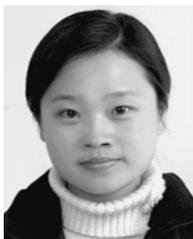
- [1] Werninghaus R and Buckreuss S. The TerraSAR-X mission and system design[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 606-614.
- [2] Suess H and Buckreuss S. The dual-use potential of the TerraSAR-X Mission[J]. *SPIE*, 2009, 7308: 1-8.
- [3] Pitz W and Miller D. The TerraSAR-X satellite[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 615-622.
- [4] Oliver C and Queagan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Boston USA, SciTech Publishing Inc, 2004, Chapter 1.
- [5] Zhang Yue-ting and Ding Chi-biao. Special phenomena of the shadow region in the high resolution synthetic aperture radar image due to synthetic aperture[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(10): 1052-1070.
- [6] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, *et al.* Building feature extraction via a deterministic approach: application to real high resolution SAR images[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, 2007: 2681-2684.
- [7] Chen Hong-zhen, Zhang Yue-ting, Wang Hong-qi, *et al.* SAR imaging simulation for urban structures based on analytical models[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(6): 1127-1131.
- [8] Guida R, Iodice A, and Riccio D. Assessment of TerraSAR-X products with a new feature extraction application: monitoring of cylindrical tanks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 930-938.
- [9] Soegel B U, Thiele A, Gorss H, *et al.* Extraction of bridge features from high-resolution InSAR data and optical images[C]. *Urban Remote Sensing Joint Event*, Paris, 2007, 10.1109/URS.2007.371882.
- [10] Wang Gui-ting, Huang Shan, and Jiao Li-cheng. An automatic bridge detection technique for high resolution SAR images[C]. *Asian Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Xi'an, China, 2009: 498-501.
- [11] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. London: Artech House, 2005, Chapter 5.
- [12] Auer S, Hinz S, and Bamler R. Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1445-1456.
- [13] <http://www.uutu.com/fotolog/photo/98470> [OL]. 1998.

作 者 简 介



张月婷(1983-), 女, 中国科学院电子学研究所助理研究员, 主要从事SAR 图像仿真和SAR图像理解领域的研究。

E-mail: zhangyueting06@mails.gucas.ac.cn



仇晓兰(1982-), 女, 中国科学院电子学研究所副研究员, 主要从事SAR成像处理领域研究。长期从事先进体制SAR数据处理方面的研究工作, 主要研究方向包括单/双站SAR成像处理、干涉SAR处理、SAR星地一体化仿真技术等。参与中国遥感卫星一号、六号等的成像处理

系统建设、定标信号分析等工作, 参与高分重大专项等多个重大项目。



丁赤飏(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 现任中国科学院电子学研究所副所长, 主要从事合成孔径雷达、遥感信息处理和应用系统等领域的研究工作, 先后主持多项国家863 重点项目和国家级遥感卫星地面系统工程建设项目, 曾获国家科技进步一等奖、二等奖各一项。

雷 斌(1978-), 男, 中国科学院电子学研究所研究员, 信号处理与应用技术研究实验室主任, 多源空间信息处理系统技术方向的学科带头人。作为项目负责人先后主持了中国遥感卫星系列卫星地面处理系统、多星多传感器地面系统体系结构和关键技术研究、多波段机载SAR机动成像处理系统、全国陆地观测卫星接收站网记录系统等多项国家重大工程项目的研制工作。曾获中科院杰出成就奖、军队科技进步二等奖等奖励。

付 琨(1973-), 男, 研究员, 中国科学院电子学研究所所长助理, 中科院空间信息处理与应用系统重点实验室主任, 高分辨率对地观测国家重大专项地面系统专家组专家, 高分辨率对地观测国家重大专项航空系统专家组专家, 数字鄂尔多斯专家组专家。主要研究方向为地理空间信息处理与可视化、地理空间数据挖掘、SAR图像理解等。