## 基于北斗导航卫星的多角度双基地 SAR 成像与融合

曾 涛 敖东阳 胡 程\* 张 天 (北京理工大学信息与电子学院 北京 100081)

摘 要: GNSS-BSAR 是一种利用导航卫星作为发射机的双基地 SAR (BSAR)系统,具有系统代价低等特点,但 是其图像分辨率差、信噪比低。结合我国现有的北斗导航卫星系统,该文提出了一种 BSAR 多角度观测与数据处 理方法,实现了对目标区域的多角度观测,共获取了 26 种几何配置下的图像,并提出一种感兴趣区域融合方法生 成了多融合图像。获得了较高质量的图像,证明了多角度融合是一种扩展 GNSS-BSAR 遥感应用的有效途径。 关键词: 双基地 SAR (BSAR);导航卫星;多角度;图像融合;图像解译 中图分类号: TN95 文献标识码: A 文章编号: 2095-283X(2014)06-0632-09 DOI: 10.12000/JR14121

# Multiangle Bistatic SAR Imaging and Fusion Based on BeiDou-2 Navigation Satellite System

Zeng Tao Ao Dong-yang Hu Cheng Zhang Tian (School of Information and Electronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Bistatic Synthetic Aperture Radar (BSAR) based on the Global Navigation Service System (GNSS-BSAR) uses navigation satellites as radar transmitters, which are low in cost. However, GNSS-BSAR images have poor resolution and low Signal-to-Noise Ratios (SNR). In this paper, a multiangle observation and data processing strategy are presented based on BeiDou-2 navigation satellite imagery, from which twenty-six BSAR images in different configurations are obtained. A region-based fusion algorithm using region of interest segmentation is proposed, and a high-quality fusion image is obtained. The results reveal that the multiangle imaging method can extend the applications of GNSS-BSAR.

**Key words**: Bistatic SAR (BSAR); Global Navigation Service System (GNSS); Multi-angle; Image fusion; Image interpretation

## 1 引言

双基地雷达(Bistatic Synthetic Aperture Radar, BSAR)是一种收发分置的雷达系统,它可以利用外辐射源信号作为照射源,相比传统雷达,被动 BSAR 更小、成本更低。外辐射源信号,如电视、卫星、单基地雷达发射机都可作为外辐射源。 学者们已经研究过包括低轨的通信卫星和 GNSS (Global Navigation Satellites System)卫星在内的多种外辐射源雷达系统<sup>[1]</sup>。其中,最受关注的是利用 GNSS 卫星作为发射机的 BSAR 体制。

基于 GNSS 的被动式照射雷达最早出现在文 献[2]中,它是一种测量海洋高度变化的工具,主要 应用在海浪测高、风速反演<sup>[3,4]</sup>,测量土地湿度等方 面<sup>[5]</sup>。随着硬件水平和处理技术的提高,被动雷达 的成像能力也受到了关注。在遥感成像方面,英国 伯明翰大学利用 GLONASS 卫星获取了第 1 幅 GNSS-BSAR 图像<sup>[6]</sup>。同时,北京理工大学也开展 了 GPS 卫星的成像实验<sup>[7,8]</sup>,其研究成果都展示了 导航卫星 BSAR 成像能力与可行性。

GNSS-BSAR 图像和传统 SAR 图像有很大的 差别<sup>[9]</sup>,无法反映目标的轮廓信息和几何特征。图 像质量较差的主要原因是导航信号带宽窄,目标双 基地散射特性差异大。图像质量不高导致其难以支 撑其在遥感领域中的应用。因此,亟待研究提高 GNSS-BSAR 图像质量的方法。

本文使用北斗导航卫星作为外辐射源发射机, 设计了多种几何配置下照射观测的实验策略,提出 了一整套多角度 GNSS-BSAR 实验系统和处理方 法。该方法利用空间角度域的信息弥补了传统 GNSS-BSAR 图像分辨率低、信噪比差的缺陷,丰 富了图像特征,展示了 GNSS-BSAR 对目标的分辨 和重构能力。使得图像能够十分明显地分辨出目标

<sup>2014-10-30</sup> 收到, 2014-11-27 改回; 2014-12-12 网络优先出版 国家自然科学基金(61120106004, 61225005, 61427802)资助课题 \*通信作者: 胡程 cchchb@163.com

的形状、大小、位置、阴影及布局。综上所述, GNSS-BSAR 多角度观测融合体制能够获取的图像具备 了遥感应用价值。

文章的结构安排如下:第2节介绍多角度的实验场景和实验参数设置。第3节分析了图像融合的传统方法并介绍了感兴趣区域(ROI)分区域融合后的图像。

## 2 基于导航卫星的多角度成像

已经在轨运行的 GNSS 系统有美国的 GPS, 俄罗斯的 GLONASS 和中国的北斗导航系统<sup>[10]</sup>。目 前,利用这 3 种导航系统的 BSAR 单角度成像实验 研究取得了一定的成果,但是也遇到图像效果差、 目标无连续轮廓等一系列问题。

多角度观测是解决上述问题的一种重要方法, 它利用实验拓扑结构的几何多样性,增加捕获到目 标强散射回波的概率,从而丰富雷达图像特征。多 角度观测的实施需要灵活多变结构的实验。当前三 大导航系统中,北斗导航系统不仅同时实现了亚太 地区的覆盖,而且还具有比另外两个导航系统更大 的信号带宽,能够使得生成的图像信噪比高、分辨 率好。北斗导航卫星系统是由我国自主研发的导航 系统,截止到目前为止,在轨运行的一共有 14 颗 卫星,其中4颗MEO,5颗IGSO,5颗GEO。在 本文所使用的发射机资源中,我们采用的是轨道更 低的 MEO 卫星。使用的是 B3 频段的信号,载频 为 1.26 GHz (L 波段), PRT 为 1 ms,带宽为 20 MHz,地面最低接收功率为-157.6 dBW。

多角度成像实验使用所有出现在实验场景上 空的 MEO 卫星作为雷达发射机,这样,同一区域 有多个不同角度下的卫星照射,可以充分利用目标 场景角度域的信息。实验的几何示意图如图1所示。 我们在同一实验区域总共采集了 26 次导航卫 星过顶时的实验数据。每一次实验的发射机俯仰角 和中心方位角的数据列在表 1 中。实验在北京理工 大学常熟研究院开展, 雷达照射区域的 Google Earth 图像如图 2 所示。

实验接收系统设备包括:信号源,直达波天线、 雷达波天线,接收机和数据采集器,如图3所示。 其中,信号源向数据采集器提供时钟信号,直达波 天线接收直达波信号,回波天线接收目标反射的回 波信号,接收机将接收信号解调,数据采集器将接 收机里的两路信号分别采样并存储。

采集实验数据,对其进行成像处理<sup>[11]</sup>。本文采用 BP (Back-Project)成像算法将图像投影至同一个地距网格中。具体的处理流程框图如图 4 所示。

多角度 GNSS-BSAR 实验流程包括: (1)数据采 集。采集直达波信号和回波信号,并存储数据; (2) 同步处理。利用直达波信号校正回波信号的相位; (3)距离向处理。采用码相关技术进行距离向压缩; (4)方位向处理。利用解算出的导航卫星精密轨道数



图 1 实验结构几何示意图

Fig. 1 Geometrical structure of the experiment

Tab. 1   Angle data of 26 experiments									
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
方位(°)	22	81	50	79	77	80	81	80	51
俯仰(°)	292	248	302	295	304	286	257	228	276
编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
方位(°)	51	50	23	25	30	80	84	85	82
俯仰(°)	268	262	267	271	280	315	294	242	202
编号	19	20	21	22	23	24	25	26	
方位(°)	77	81	28	27	61	84	80	86	
俯仰(°)	304	260	281	277	280	231	218	275	

表 1 26 次实验的角度数据



图 2 实验场景的 Google Earth 图像

Fig. 2 Google Earth image of the test site



图 3 接收系统设备

Fig. 3 Equipment of the receiving system



图 4 导航卫星 BSAR 成像处理框图 Fig. 4 The flowchart of multi-angle observation GNSS-BSAR

据进行后向投影,获得最后的双基地 SAR 图像; (5)图像融合处理。采用自适应区域分割方法融合每 一次实验获得的图像。图 5 是 26 组数据成像结果。

我们粗略地分析了导航卫星的一些基本特征。 一些代表性图片见图 6。

这两幅图像都是由一大堆孤立点排列而成,并 且在一些目标区域中不连续很难分清楚哪些是目 标哪些是噪声,另一个很明显的现象是在不同的卫 星角度照射下,图像中强弱分布也改变了,一些亮 点在另一种角度照射下消失不见(如图 6 中红线框 出的区域),而在其他地方出现强点。这种强弱分 布不均衡是由于雷达几何配置不同引起的。

## 3 多角度双基地 SAR 图像融合

图像融合是丰富图像特征的有效手段。本文的 目标是结合 GNSS-BSAR 图像本身的特性,采用合 适融合算法,使得融合图像能获取场景目标的形 状、大小等信息并保留良好的视觉效果。图像融合 主要分为4个层次:信号级、像素级、特征级和符 号级<sup>[12-14]</sup>。我们将重点关注应用最为广泛的像素级 融合方法。其核心是设计合适的融合策略,定义为:

$$I_{f}(x,y) = g(I_{1}(x,y), I_{2}(x,y), \cdots, I_{K}(x,y))$$
(1)

其中 *I*<sub>1</sub>(*x*,*y*),*I*<sub>2</sub>(*x*,*y*),…,*I*<sub>K</sub>(*x*,*y*)表示 *K* 幅观测场景 相同的图像。*g* 为 ICA 算法操作算子。目前主要的 传统方法可以分为线性方法<sup>[15,16]</sup>和非线性方法<sup>[15,16]</sup>。 其中,线性方法中的平均法与非线性方法的选大法 最具有代表性。采用这两种融合算子获得的结果分 别如图 7(a)和图 7(b)所示。这两种算子都增强了图 像,但是缺陷也非常明显,平均法图像平滑明亮, 但是会出现特征模糊的问题。由于平均法是将像素 值求平均,那么就会有一些像素或区域在不同的图 像中有不同的像素值。由于平均法的作用,融合后 会变得更暗、更模糊。另一方面,选大法融合的图



#### 图 5 26 次实验成像结果

Fig. 5 Imaging results of 26 experiments





像保留了大部分的特征,但是整个图像中有较多不 连续区域,杂波也较为明显。因此我们采用了新的 算法来完成多角度图像融合。

考虑到传统融合方法的缺点,本文提出了一种 基于自适应区域分割的图像融合方法。对同一目标 场景多个不同角度照射下的图像,基于图像特征的 分析,对图像区域进行分类,最后在不同的区域采 用不同的融合算法,获得质量较高、可解译性强的 融合图像。具体步骤如下文。

#### 3.1 图像预处理与区域分类

获取对同一目标场景多个不同角度照射下的 GNSS-BSAR 图像,对于这些图像,为了保证融合



(b) 选大法 (b) Maximum

图 7 传统融合算法效果 Fig. 7 The traditional fusion method results

的效果,丰富图像的动态范围,使用以 dB 图的方 式显示图像:

$$I(u,v) = 20 \lg \left( I_{\text{norm}}(u,v) \right) \tag{2}$$

其中在图像量化处理完成之后,获得了具有相同范 围的图像。它们的区别仅仅在于目标各项异性产生 的散射特性不同。对于不同类型的目标,有不同的 方法可以获得不同的融合效果。因此,图像融合需 要借助特征信息进行。

根据人类的认知原理和图像显著性理论[17],可 以将图像分为感兴趣区域(ROI)和其他区域。在不 同的应用场景下, ROI 的具体定义也不同。考虑到 GNSS-BSAR 图像在遥感中实际应用场景,把图像 分为3类区域:一类是ROI,另一类是非ROI,最 后一种是杂波区域。对于遥感图像来说,强点目标 和区域轮廓都是重要的特征。因此,将 ROI 定义 为强点目标及其周围区域,因为这些区域回波信号 能量强,极有可能是反射卫星信号的建筑物等目 标,这在遥感中也是非常重要的。然而把植被目标、 区域轮廓等特征区域定义为非 ROI, 它们更多地包 含了关于实验场景整体的一些信息。最后,将剩下 的区域定义为杂波。

#### 3.2 单幅图像区域自适应分割

在 3.1 节中,将 ROI 定义为强点目标及其周围 区域,把植被目标、区域轮廓等特征区域定义为非 ROI,剩下的区域定义为杂波。在实际应用中,是 根据图像的强度值来区分目标的区域。但是简单的 阈值分割会造成图像的不连续。为此提出利用马尔 可夫随机场(MRF)和 SAR 杂波模型的 ICM (Iterated Conditional Modes)图像分割方法, 自适 应地对不同角度的图像的各个区域进行判决,将结 果分为 ROI、非 ROI 及杂波区域, 对这 3 种区域 使用不同的处理方法,使得最终的融合图像既抑制 了杂波,又能够最大限度地提取目标信息。

## (1) 改进 MRF 模型

基于马尔可夫随机场的图像分割手段对 SAR 图像特别有意义。能够标记图像的上下文信息,分 析图像的统计特性。图像分割的过程实际就是估计 观测图像每一个像素点分类状态的过程。可以归结 为给定观测图像 Y,估计出对应的分割图像 X。估 计分割图像 X 的过程通常遵循最大后验概率准则 (MAP),即估计 $\hat{X} = \arg \max P(X | Y)$ 。由于P(Y)为常数且与 X 无关, 后验概率等价为:

$$P(X | Y) \propto P(Y | X)P(X) \tag{3}$$

式(3)中的 P(Y | X) 成为似然分布。要对整幅观测 图像进行联合建模十分困难,而且计算非常复杂。 通常的做法是对单个像素点独立建模。假设观测图 像各个像素点之间以及像素点和各个分类状态之 间是相互独立的,那么:

$$P(Y \mid X) = \prod_{i \in S} P(y_i \mid x_i)$$
(4)

式(4)包含关于标记场 X 的先验知识,通常假设标 记图像X完全由局部上下文信息所确定。根据前提 条件可以确定 X 是马尔科夫随机场。由 Hammersley-Clifford 定理<sup>[18]</sup>,可以确定马尔科夫 随机场和 Gibbs 随机场的等价性。Gibbs 分别可以 表示为:

$$P(X) = \frac{1}{Z} \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{c \in C} V_c(X)\right\}$$
(5)

其中 Z 是热力学温度,  $Z_i = \sum_{x} \exp\{-(1/T)\}$  $\cdot \sum_{c \in C} V_c(x_i)$ 为归一化函数, c为基团, C为所有 基团的集合。最终,基于 MRF 模型的 SAR 图像 分割归结为一个求最大后验概率的问题,由式(4) 和式(5)可以得到全局后验概率的最终形式:

$$P(X \mid Y) \propto \prod_{i \in S} \frac{1}{Z} \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{c \in \eta_i} V_c(x_i)\right\} P(y_i \mid x_i) \quad (6)$$

由式(6),最大后验概率得出的最佳分割可以转化为 式(7)最小值求解:

$$\widehat{X}_{\text{opt}} = \arg\min\left\{\frac{1}{T}\sum_{i\in S}\sum_{c\in\eta_i} V_c\left(x_i\right) - \sum_{i\in S}\ln P\left(y_i \mid x_i\right)\right\} (7)$$

其中势函数和邻域的选择可以根据不同的应用选取不同的形式。为了使该模型更好地利用 GNSS-BSAR 图像本身的特点,我们改进了基团 c 的选择模式。经典的 MRF 分割中,计算基团 c 的时候都是利用均匀 3×3 邻域及其子集,即:

$$V_c = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$
(8)

当其周围像素点分割状态与中心原点状态一 致时,取负值;当分割状态不一致时,取正值。这 样,当整个邻域所有的状态都一致时,先验概率  $P(x_i)$ 最大。

#### (2) GNSS-BSAR 杂波统计模型

在 MRF 分析中,由式(7)可以看出,最佳分割 结果由势函数 V<sub>c</sub> 和观测模型的似然分布 P(Y | X) 共同决定。在实际应用中,观测模型的似然分布 P(Y | X) 通常用 SAR 图像的杂波统计模型来描 述。因此,对 SAR 图像分割首先要解决的问题是 建立一个 SAR 图像杂波精确合理的统计分布模型。

用 G<sup>0</sup>模型来描述 GNSS-BSAR 图像<sup>[19]</sup>。G<sup>0</sup>模型的思想是将图像区域按照其均匀程度分别建模。 G<sup>0</sup>分布模型形式较为简单,概率密度函数如式(9) 所示:

$$p_I(x) = \frac{n^n \Gamma(n-\alpha) \gamma^{-\alpha} x^{n-1}}{\Gamma(-\alpha) \Gamma(n) (n) (\gamma + nx)^{n-\alpha}}$$
(9)

其中形状参数  $\alpha \in (-\infty,0)$ ,反映了被测区域的均匀 度,且<sub>|\alpha|</sub>越大,表明对应的图像区域越均匀。尺 度参数  $\gamma > 0$ ,与被测区域的平均能量有关,且 $\gamma$ 越 大,表明对应的平均能量越大。在使用式(7)之前, 必须确定其分布的参数。因此需要估计出分布模型 的参数。 $G^0$ 分布全参数矩估计表达式为:

$$\hat{\gamma} = -(\hat{\alpha} + 1) E(x) 
\hat{n} = \frac{2C_1 - 2C_2}{2C_2 - C_1 - C_1C_2} 
\hat{\alpha} = \frac{3C_2 - 4C_1 + 1}{2C_1 - C_2 - 1}$$
(10)

其中,  $C_1 = E(x^2)/E^2(x), C_2 = E(x^3)/[E(x)E(x^2)]$ 。 到这里,我们完成了对图像杂波统计模型的建模与 选择。

(3) SAR 图像分割迭代算法

由前文可知,图像分割的过程就是一个求最大 后验概率的过程。SAR 图像的杂波统计模型确定 之后,似然分布也随之确定,接下来就可以根据 P(X) 和 P(Y | X) 按照一定的方法求得由最大后验概率 <math>P(X | Y)确定的最佳分割。根据前面两部分介 绍的 MRF 模型及 SAR 杂波参数模型。我们可以 写出双基地 SAR 的图像分割求解过程中的最大后 验概率计算公式:

$$P\left(x_{i} | y_{i}\right) \propto \frac{1}{Z_{i}} \exp\left\{-\frac{1}{T} \sum_{c \in \eta_{i}} V_{c}\left(x_{i}\right)\right\}$$
$$\cdot \frac{\hat{n}_{x_{i}}^{\hat{n}_{x_{i}}} \Gamma\left(\hat{n}_{x_{i}} - \hat{\alpha}_{x_{i}}\right) \hat{\gamma}_{x_{i}}^{-\hat{\alpha}_{x_{i}}} x_{i}^{\hat{n}_{x_{i}} - 1}}{\Gamma\left(-\hat{\alpha}_{x_{i}}\right) \Gamma\left(\hat{n}_{x_{i}}\right) \left(\hat{\gamma}_{x_{i}} + \hat{n}_{x_{i}} x_{i}\right)^{\hat{n}_{x_{i}} - \hat{\alpha}_{x_{i}}}} \qquad (11)$$

利用 ICM 算法求最大后验概率。ICM 算法的 目的是从受到杂波污染的观察图像 Y中估计出原始 图像 X, 具体步骤如下:

(a) 对图像中每一点的状态初始化,使用 *k* 均 值聚类分割。

(b) 逐个像素计算图像中每一点在取不同状态下的价值(Cost)函数;

(c) 比较不同状态的代价,在可能状态中选取 最小价值的状态作为下次重复的状态值;

(d) 重复步骤(b)、步骤(c)直到每个像素的状态均不改变。

假设第 k次重复像素 i可能的状态为  $x_{ip}^{k}$ ,像素 i的观测值为  $y_i$ ,那么价值函数选取的是局部后验 概率最大的状态作为下次重复状态值,即

 $x_i^{k+1} = \arg\max\left\{p\left(x_i \mid x_j^k, y_j\right), j \in \eta_i\right\}$ (12)

输入单幅图像之后,经过改进的 MRF-MAP 的分割算法,每一幅图像都得到其分割后的图像 *X*(*u*,*v*)。

#### 3.3 区域的合并与融合

分割过程将每一幅图像都分成了 3 个区域, ROI,非 ROI 及杂波区域。不同角度下的图像是不 一样的,因而图像分割之后每一幅图像的 ROI 也 是不一样的。由于 ROI 是分割出来的感兴趣部分, 需要在最后融合的图像中展示所有的信息。对于 ROI,采用区域合并的方式。

$$\operatorname{ROI}_{\operatorname{fus}} = \operatorname{ROI}_1 \cup \operatorname{ROI}_2 \cup \dots \cup \operatorname{ROI}_i$$
(13)

而对于非 ROI 区域,它的像素包含了一些关 于轮廓、大小、明暗的信息。由于算法和模型本身 的误差,在图像分割时可能将一部分杂波划入了该 区域。我们假定在某一像素点在单一图像中出现同 样的分割结果的次数达到某一数量时,该点才被认 为是非 ROI 区域,具体的实现过程如下:

$$\operatorname{un}_{\operatorname{ROI}} = \left\{ (u, v) \middle| X_i(u, v) \in \operatorname{un}_{\operatorname{ROI}}, \\ i \in S, \operatorname{card}(S) > N \right\}$$
(14)

*S*为(*u*,*v*)像素点属于非 ROI 的图像集合,其元素 个数必须大于某一值 *N*。如果该像素已经包含在 ROI 中,则将其认定为 ROI。

最后,杂波区域对于图像是不利的。在选择出了 ROI 和非 ROI 之后,将剩下的区域判定为杂波 区域,公式如下:

no 
$$\operatorname{reg} = I - \operatorname{ROI} - \operatorname{un} \operatorname{ROI}$$
(15)

在进行完上述几步操作之后,生成了最终融合 图像的一个分割,ROI,非ROI及杂波区域。

在前文中,获取了最终融合图像的区域分割形式。基于图像分割结果及其表现特性,需要在不同的区域采用不同的融合算子。对于 ROI,它是在融



图 8 算法流程图

Fig. 8 The flowchart of fusion method

合图像中展现信息的主要部分,采用选大法保留该 区域所有的像素特征。非 ROI 有大量的整体缓变 信息,选择平均法以保留更多的轮廓信息。而杂波 区域则需要通过置零去抑制。具体表现形式为:

$$I_{\text{fus}} = \begin{cases} \max \left( I_1(u, v), I_2(u, v), \cdots, I_K(u, v) \right), \\ (u, v) \in \text{ROI} \\ \max \left( I_1(u, v), I_2(u, v), \cdots, I_K(u, v) \right), \\ (u, v) \in \text{un\_ROI} \\ 0, \quad (u, v) \in \text{cl\_reg} \end{cases}$$
(16)

在进行上述 5 步之后,就能获得最终的融合图像 *I*<sub>fus</sub>。本算法的流程图如图 8 所示,融合后的图像如图 9 所示。

从图 10 的比较中得到, ROI 图像上在保留细节的时候同时注重了整体效果,图像较为整齐,杂 波较少。对于图像的好坏很难用客观的标准评价, 当前并没有统一的评价标准。在遥感图像中,我们 将各类型目标的单角度图像和多角度图像对比来 展示图像增强的效果。



图 9 ROI 算法融合结果 Fig. 9 Fusion result of ROI method



图 10 单角度图像与多角度融合图像对比 Fig. 10 Comparison between multi-angle and single angle images

图 10 是单角度图像和多角度融合图像的整体 效果对比,从中可以看到多角度图像要比单角度图 像的信息丰富得多。如果没有光学图像的辅助,单 角度图像几乎无法分辨出场景中的物体。图 11 展 示了多角度融合图像的目标解译结果。可以看到各 种类型的目标在融合图像中都有很好的展现。水域 和绿化带的轮廓都十分清晰,小桥与厂房的蜿蜒趋 势、道路两旁的细小目标在图像中获得。



图 11 多角度融合图像目标解译 Fig. 11 Target interpretation of multi-angle fusion image

## 4 结束语

本文提出了一种基于 GNSS 系统的 BSAR 多 角度观测处理方法,核心思想是利用多角度观测的 几何多样性,完成了对观测区域内的遥感成像过 程。多角度 GNSS-BSAR 使用的是离散的角度,其 图像能达到近似的效果。通过对比单角度图像的图 像解译结果,说明了 GNSS 系统卫星数目的优势可 以弥补它在分辨率、信噪比等方面的不足,多角度 观测处理方法能够提升 GNSS-BSAR 体制在遥感 领域中的应用价值。未来的工作是进一步分析散射 特性和几何结构与 BSAR 成像结果的对应关系,以 及图像融合效果比较,以期找到更好的实验方案和 处理方法来进行遥感观测。

#### 参考文献

- Cherniakov M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar-prospective andproblems[C]. Radar2002, Edinburgh, UK, 2002: 22–25.
- [2] Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. Ecological Society of America (ESA) Journal, 1993, 17(4): 331–355.

- [3] Masters D, Axelrad P, Zavorotny V, et al. A passive GPS bistatic radar altimeter for aircraft navigation[C]. Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Cambridge, Massachusetts, 2001: 2435–2445.
- [4] Vinande E, Akos D, Masters D, et al. GPS bistatic radar measurements of aircraft altitude and ground objects with a software receiver[C]. Proceedings of the 61st Annual Meeting of the Institute of Navigation, Cambridge, Massachusetts, 2001: 528–534.
- [5] Ulander L M H. Theoretical Considerations of Bi-and Multistatic SAR[M]. Swedish Defence Research Agency, 2004: 12–15.
- [6] Antoniou M, Zeng Z, Feifeng L, et al. Experimental demonstration of passive BSAR imaging using navigation satellites and a fixed receiver[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(3): 477–481.
- [7] 田卫明,曾涛,胡程. 基于导航信号的 BiSAR 成像技术[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 39-45.
  Tian Wei-ming, Zeng Tao, and Hu Cheng. Imaging algorithm for bistatic SAR based on GNSS signal[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 39-45.
- [8] Tian Wei-ming, Zhang Tian, Zeng Tao, et al. Space-surface

BSAR based on GNSS signal: synchronization, imaging and experiment result[C]. 2014 IEEE Radar Conference, Cincinnati, OH, 2014: 512–516.

- [9] Saini R, Zuo R, and Cherniakov M. Problem of signal synchronisation in space-surface bistatic synthetic aperture radar based on global navigation satellite emissionsexperimental results[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 110–125.
- [10] Satellite navigation[OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/satellite navigation, 2014.
- [11] Lingren T. Algorithm development for multistatic GNSS radar technology[D]. [Ph.D. dissertation], Lulea University of Technology, 2007.
- [12] Abidi M A and Gonzalez R C. Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence[M]. San Diego: Academic Press, 1992: 78–90.
- [13] Aggarwal J. Multisensor Fusion for Computer Vision[M]. Berlin: Springer, 1993: 136–175.
- [14] Burt P J and Kolczynski R J. Enhanced image capture

## 作者简介

習 涛(
 导师, 衣
 统、雷;

曾 涛(1971-),男,工学博士,博士生导师,研究员,主要研究方向为雷达系统、雷达信号处理、新体制雷达。

through fusion[C]. Proceedings of Fourth International Conference on Computer Vision, Berlin, 1993: 173–182.

第3卷

- [15] Li H, Manjunath B S, and Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, 57(3): 235–245.
- [16] Mitianoudis N and Stathaki T. Pixel-based and region-based image fusion schemes using ICA bases[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 131–142.
- [17] Lewis J J, O'callaghan R J, Nikolov S G, et al. Region-based image fusion using complex wavelets[C]. Seventh International Conference on Information Fusion, Stockholm, Sweden, 2004: 555–562.
- [18] Weisenseel R A, Karl W C, Castanon D A, et al.. MRF-based algorithms for segmentation of SAR images[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, 1998: 770–774.
- [19] Wu Y, Ji K, Yu W, et al.. Region-based classification of polarimetric SAR images using Wishart MRF[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 668–672.



胡 程(1981-),男,工学博士,博士生 导师,研究员,主要研究方向为新体制 成像雷达、雷达信号处理。 E-mail: cchchb@163.com



敖东阳(1991-),男,博士生,研究方向 为双基地雷达信号处理、雷达图像处理 与解译。