

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](https://doi.org/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^[1]。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^[3,4], 测量土地湿度等方面^[5]。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^[6]。同时, 北京理工大学也开展了 GPS 卫星的成像实验^[7,8], 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^[9], 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

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^[10]。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^[11]。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

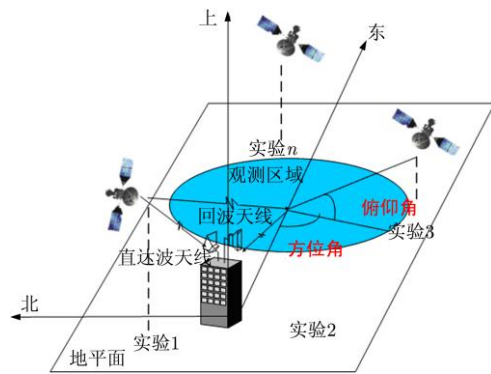


图 1 实验结构几何示意图

Fig. 1 Geometrical structure of the experiment

表 1 26 次实验的角度数据

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	



图2 实验场景的 Google Earth 图像

Fig. 2 Google Earth image of the test site

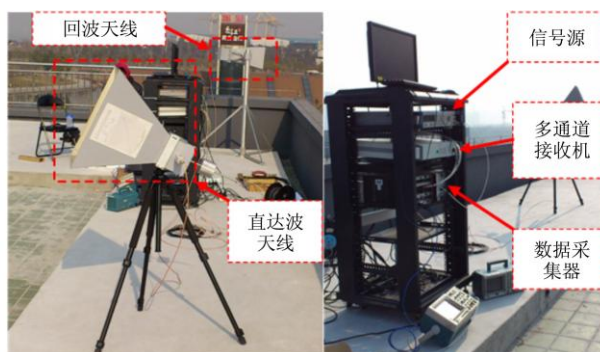


图3 接收系统设备

Fig. 3 Equipment of the receiving system

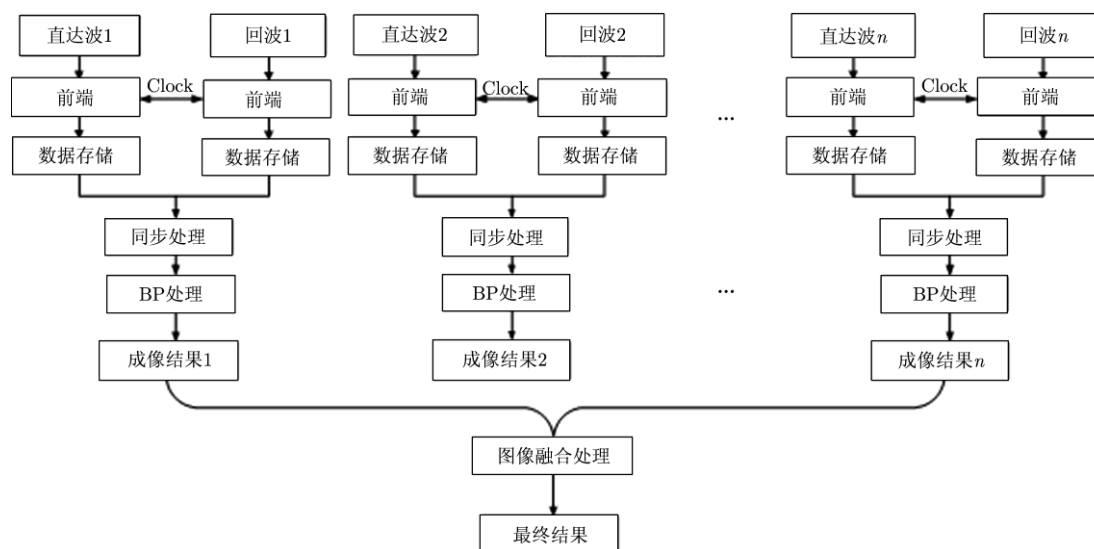


图4 导航卫星 BSAR 成像处理框图

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看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), 而在其他地方出现亮点。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, 使得融合图像能获得场景目标的形

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^[12-14]。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:

$$I_f(x, y) = g(I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_K(x, y)) \quad (1)$$

其中 $I_1(x, y), I_2(x, y), \dots, I_K(x, y)$ 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^[15,16]和非线性方法^[15,16]。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

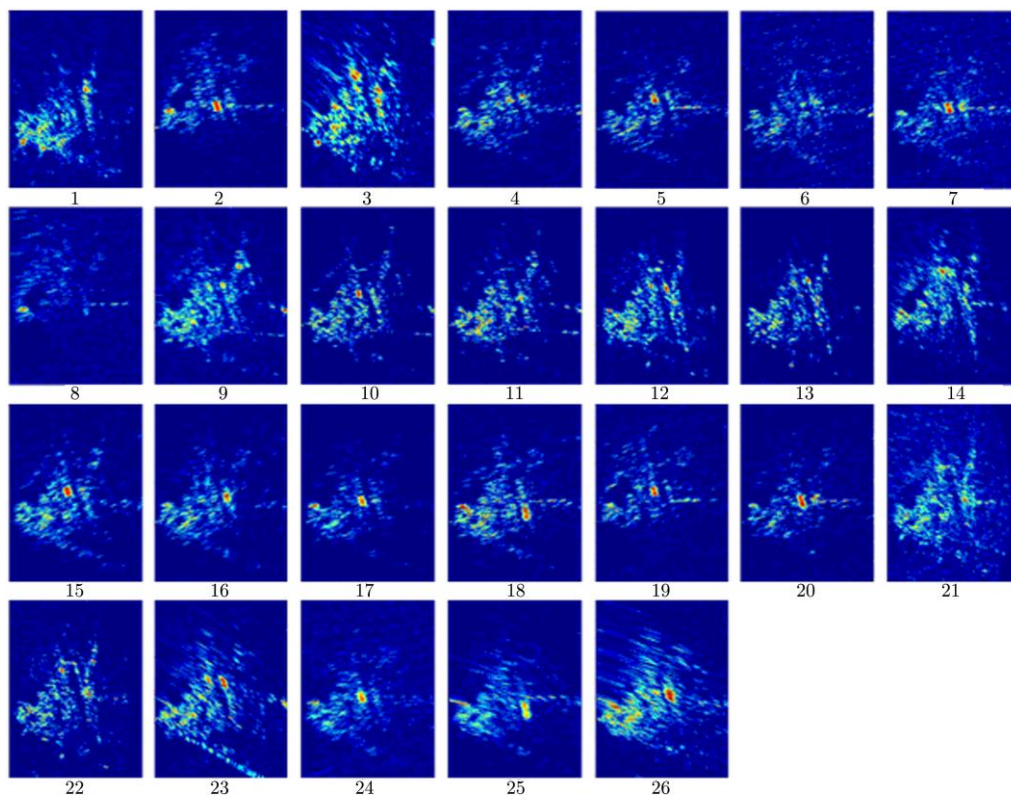


图 5 26 次实验成像结果

Fig. 5 Imaging results of 26 experiments

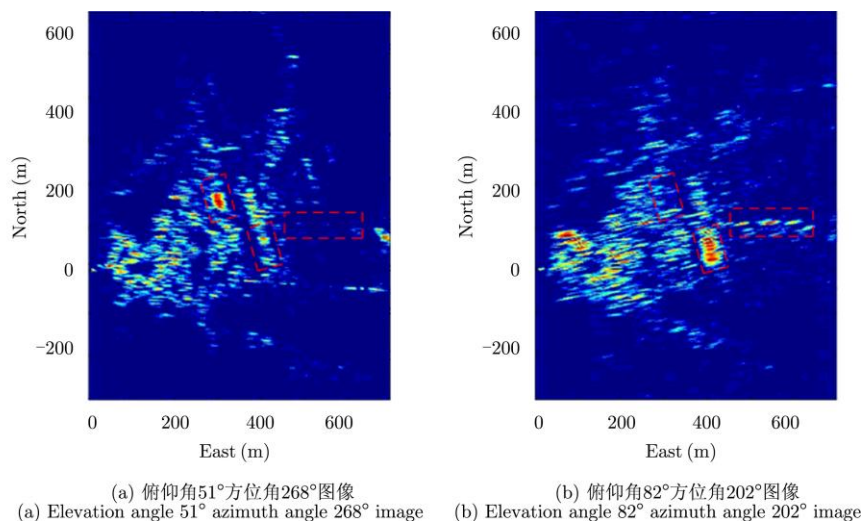


图 6 两幅代表性图片

Fig. 6 Two representative images

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

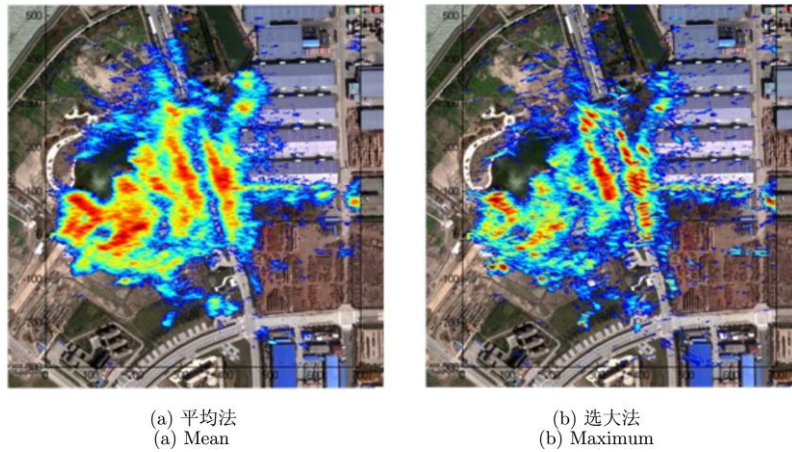


图7 传统融合算法效果

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:

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

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:

$$P(X | Y) \propto P(Y | X)P(X) \quad (3)$$

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:

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

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^[18],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:

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

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：

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

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：

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

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：

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

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

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

其中形状参数 $\alpha \in (-\infty, 0)$ ，反映了被测区域的均匀度，且 $|\alpha|$ 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 γ 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：

$$\left. \begin{aligned} \hat{\gamma} &= -(\hat{\alpha} + 1) E(x) \\ \hat{n} &= \frac{2C_1 - 2C_2}{2C_2 - C_1 - C_1 C_2} \\ \hat{\alpha} &= \frac{3C_2 - 4C_1 + 1}{2C_1 - C_2 - 1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

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 $P(X|Y)$ 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：

$$P(x_i | y_i) \propto \frac{1}{Z_i} \exp \left\{ -\frac{1}{T} \sum_{c \in \eta_i} V_c(x_i) \right\} \cdot \frac{\hat{n}_{x_i}^{\hat{n}_{x_i}} \Gamma(\hat{n}_{x_i} - \hat{\alpha}_{x_i}) \hat{\gamma}_{x_i}^{-\hat{\alpha}_{x_i}} x_i^{\hat{n}_{x_i}-1}}{\Gamma(-\hat{\alpha}_{x_i}) \Gamma(\hat{n}_{x_i}) (\hat{\gamma}_{x_i} + \hat{n}_{x_i} x_i)^{\hat{n}_{x_i}-\hat{\alpha}_{x_i}}} \quad (11)$$

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：

- 对图像中每一点的状态初始化，使用 k 均值聚类分割。
- 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；
- 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；
- 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

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

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。

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

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：

$$\text{un_ROI} = \left\{ (u, v) \mid X_i(u, v) \in \text{un_ROI}, \right. \\ \left. i \in S, \text{card}(S) > N \right\} \quad (14)$$

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：

$$\text{no_reg} = I - \text{ROI} - \text{un_ROI} \quad (15)$$

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

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：

$$I_{\text{fus}} = \begin{cases} \max(I_1(u, v), I_2(u, v), \dots, I_K(u, v)), & (u, v) \in \text{ROI} \\ \text{mean}(I_1(u, v), I_2(u, v), \dots, I_K(u, v)), & (u, v) \in \text{un_ROI} \\ 0, & (u, v) \in \text{cl_reg} \end{cases} \quad (16)$$

在进行上述 5 步之后，就能获得最终的融合图像 I_{fus} 。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。

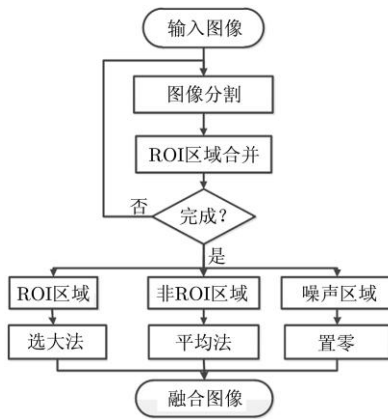


图 8 算法流程图

Fig. 8 The flowchart of fusion method

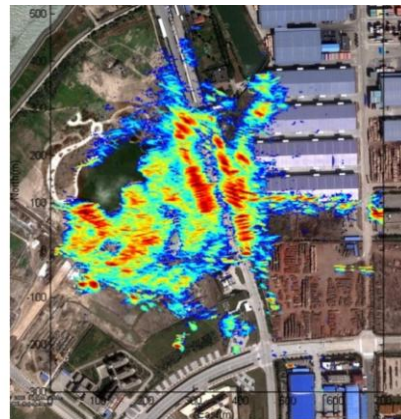


图 9 ROI 算法融合结果

Fig. 9 Fusion result of ROI method

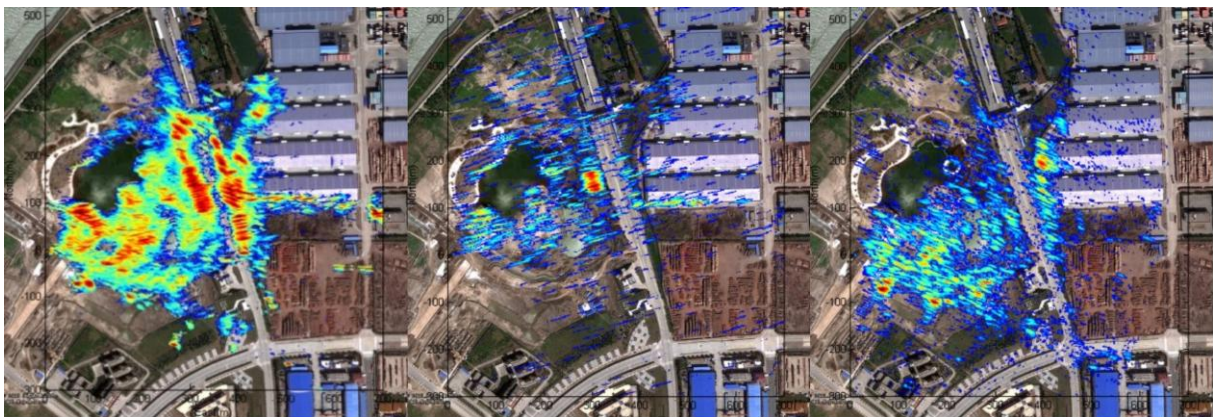


图 10 单角度图像与多角度融合图像对比

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。

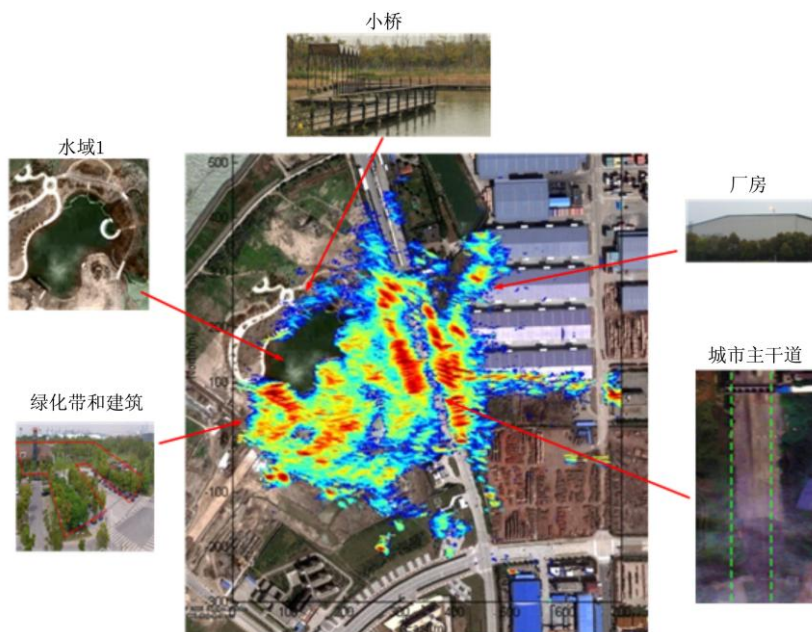


图 11 多角度融合图像目标解译

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

- [1] Cherniakov M. Space-surface bistatic synthetic aperture radar-prospective and problems[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 emissions-experimental 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 through fusion[C]. Proceedings of Fourth International Conference on Computer Vision, Berlin, 1993: 173-182.
- [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.

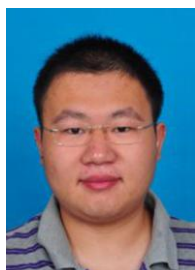
作 者 简 介



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。



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。