

## 面向目标特性精细提取的 SAR 数据融合成像处理方法

杨威\* 陈杰 李春升

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

**摘要:** 针对当前高分辨率星载 SAR 数据处理忽略目标相关散射特性随方位角变化而导致目标轮廓细节难以精细提取的问题, 该文提出了一种面向目标特性精细提取的融合成像处理方法。首先, 分析高分辨率条件下影响目标特性提取和 SAR 图像质量的因素, 如轨道非线性、“停-走”模型、大气延时、高阶残留相位误差等, 并提出针对性的补偿方法。在此基础上, 建立基于目标时空谱特性的回波数学信号模型, 解析目标散射特性时-空-频的变化规律, 提出针对高分辨率、超大方位观测角范围的融合成像处理策略和方法, 在距离-多普勒域、图像域通过融合处理提升 SAR 图像的品质。最后, 通过对典型军事目标的仿真和成像处理, 验证所提方法的有效性。

**关键词:** 星载 SAR; 目标特性; 高分辨率; 融合成像

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2015)01-0029-09

**DOI:** 10.12000/JR15017

**引用格式:** 杨威, 陈杰, 李春升. 面向目标特性精细提取的 SAR 数据融合成像处理方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 29-37. <http://dx.doi.org/10.12000/JR15017>.

**Reference format:** Yang Wei, Chen Jie, and Li Chun-sheng. SAR data fusion imaging method oriented to target feature extraction[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 29-37. <http://dx.doi.org/10.12000/JR15017>.

## SAR Data Fusion Imaging Method Oriented to Target Feature Extraction

Yang Wei Chen Jie Li Chun-sheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To deal with the difficulty for target outlines extracting precisely due to neglect of target scattering characteristic variation during the processing of high-resolution space-borne SAR data, a novel fusion imaging method is proposed oriented to target feature extraction. Firstly, several important aspects that affect target feature extraction and SAR image quality are analyzed, including curved orbit, stop-and-go approximation, atmospheric delay, and high-order residual phase error. Furthermore, the corresponding compensation methods are addressed as well. Based on the analysis, the mathematical model of SAR echo combined with target space-time spectrum is established for explaining the space-time-frequency change rule of target scattering characteristic. Moreover, a fusion imaging strategy and method under high-resolution and ultra-large observation angle range conditions are put forward to improve SAR quality by fusion processing in range-doppler and image domain. Finally, simulations based on typical military targets are used to verify the effectiveness of the fusion imaging method.

**Key words:** Space-borne SAR; Target feature; High-resolution; Fusion imaging

### 1 引言

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种空间遥感对地成像有效载荷, 具备全天时、全天候执行对地成像侦察任务的能力。高分辨率作为星载 SAR 发展的永恒主题, 是各航天强国致

力发展的重要方向之一。近几年, 美国、德国、以色列、加拿大等国都陆续发射了高性能的 SAR 卫星, 其共性特点是均具备高分辨率的成像模式, 其中最具代表性的是德国 TerraSAR-X 卫星 2012 年成功试验的“凝视成像”(staring spotlight)模式, 其方位向分辨率不加权的情况可达  $0.16 \text{ m}^{[1-3]}$ 。根据美国、欧洲等国家或地区制订的星载 SAR 发展规划可知, 高分辨率仍然是星载 SAR 发展的主要方向之一<sup>[4-6]</sup>。

2015-01-26 收到, 2015-03-24 改回

国家自然科学基金重点项目(61132006)资助课题

\*通信作者: 杨威 yangweigigi@cc.buaa.edu.cn

高分辨率 SAR 图像能更好地显示目标细节,但在高分辨率条件下,目标散射特性变化对成像质量的影响不可忽略,原因包括两方面:(1)为实现方位向高分辨率,需要增大方位向观测角度范围,而目标在不同方位观测角下其散射特性不同,角度差异越大,散射特性差异也越大;(2)为实现距离向高分辨率,需要采用超宽带线性调频信号,而目标散射特性对不同频率的响应不同,带宽越大,差异越大。目前的成像处理算法,包括时域处理算法<sup>[7]</sup>、距离多普勒域处理算法<sup>[8]</sup>、距离频域方位时域处理算法<sup>[9]</sup>、多变换频域算法<sup>[10]</sup>、2 维频域算法<sup>[11]</sup>等,均以输出图像信噪比最大为准则,在整个处理过程中近似认为目标散射特性恒定不变。这种近似在中低分辨率条件下对图像质量和应用效果的影响可忽略,但在高分辨率条件下,这种近似不仅影响图像的细节信息,也不利于发挥高分辨率星载 SAR 图像的应用效能。因此,在 2014 年,针对“凝视成像”模式数据处理,德宇航人员指出目标特性随方位观测角会对图像质量产生影响,但尚未给出具体的处理方法<sup>[12]</sup>。

为精细提取高分辨率星载 SAR 图像中的目标特性信息,本文首先分析了高分辨率条件下影响 SAR 图像质量及目标特性提取的因素;在此基础上,建立基于目标空间谱和时间谱的回波数学信号模型,解析目标散射特性时-空-频的变化规律;最后,提出一种针对超高分辨率、超大方位观测角范围的融合成像处理策略和方法,实现 SAR 图像质量的显著提升,为 SAR 图像的精细解译与判读提供支撑。

## 2 高分辨率星载 SAR 图像精细聚焦处理

高分辨率 SAR 图像精细聚焦是提取目标特性的前提条件。不同于星载 SAR 中低分辨率数据的成像处理,高分辨率条件下需要额外考虑各种因素对成像聚焦质量的影响,主要包括:轨道非线性、“停-走”运动模型、对流层延迟<sup>[12]</sup>和残留高阶频谱等。本节将简述上述误差对成像质量的影响,在此基础上,基于 3 步成像处理算法<sup>[13]</sup>提出误差补偿方法。

传统星载 SAR 成像算法推导基于两种模型:轨道直线模型和“停-走”运动模型,上述模型在中低分辨率情况下得到广泛应用。但随着分辨率的提高,上述两种模型的精度难以满足精确聚焦的需求。首先,合成孔径时间越长,轨道直线模型精确性越差,尤其是轨道非线性引入的 3 次相位误差将导致方位向分辨率展宽及左右旁瓣不对称。其次,对于中低分辨率 SAR 卫星,为简化其回波信号模

型,假设卫星在发射信号和接收信号过程时位置不发生变化,被称之为“停-走”假设,但高分辨率条件下这种假设引入的误差不可忽略。例如,分辨率为 0.25 m 时,由“停-走”运动假设导致的方位向分辨率展宽可达 10%<sup>[12]</sup>。

对流层延迟效应对高分辨率成像质量的影响同样不容忽视。TerraSAR-X staring spotlight 模式数据成像结果说明,由于对流层延迟造成的相位误差和匹配滤波器失陪导致的相位误差接近 100°<sup>[12]</sup>。

在中低分辨率成像算法中,忽视了 2 维频域内方位向与距离向残留的高阶耦合相位。在高分辨率情况下,该高阶频谱误差会导致目标点散焦,特别是对边缘目标影响更大。

针对上述误差,本文对 3 步成像处理算法进行了改进,增加了误差补偿环节,在 2 维频域完成轨道非线性、“停-走”运动模型、对流层延迟和残留高阶频谱补偿。图 1 给出了适合于高分辨率情况下的改进 3 步成像算法流程图。图 2 分别给出了利用 TerraSAR-X 卫星的轨道参数进行高分辨率星载 SAR 点目标回波仿真后不进行误差补偿和补偿上述误差之后方位向成像结果剖面图,其中点目标的方位向理论分辨率为 0.2 m。

## 3 目标时空谱特性分析

在上节的基础上,分析目标时空谱特性对星载 SAR 高分辨率成像质量的影响。传统星载 SAR 回波信号数学模型如式(1)所示。

$$s_0(\tau, t) = \sigma \exp\left\{-\frac{4\pi r(t)}{\lambda}\right\} \exp\left\{-\pi b \left(\frac{\tau - 2r(t)}{c}\right)^2\right\} \quad (1)$$

其中,  $\sigma$  表示目标的稳态雷达后向散射截面积(Radar Cross Section, RCS),  $r(t)$  表示天线相位中心与目标的距离,  $\lambda$  表示雷达工作波长,  $b$  表示发射信号调频率,  $c$  表示光速,  $\tau$  和  $t$  分别表示距离向快时间和方位向慢时间。

上述模型假设目标在被照射过程中 RCS 保持不变,但随着分辨率的提高,这种假设引入的误差逐渐变大。因此,在高分辨率条件下,回波信号数学模型可修正为:

$$s_0(\tau, t) = \sigma[\varphi(t), f_r(\tau)] \exp\left\{-\frac{4\pi r(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-\pi b \left(\frac{\tau - 2r(t)}{c}\right)^2\right\} \quad (2)$$

其中,后向散射截面积  $\sigma$  被表示为一个和方位向观测角度  $\varphi(t)$  和雷达工作频率  $f_r(\tau)$  相关的函数。为便于表述,后项散射系数随方位观测角度和雷达工作频率变化的特性称为目标空间谱和时间谱。

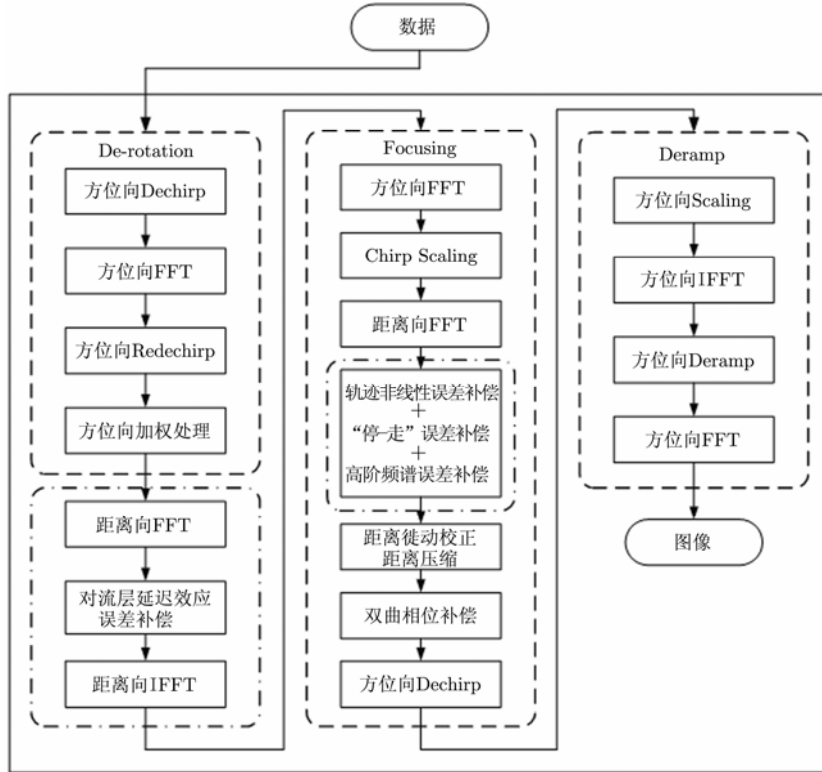


图 1 改进 3 步成像算法

Fig. 1 Modified three-step imaging algorithm

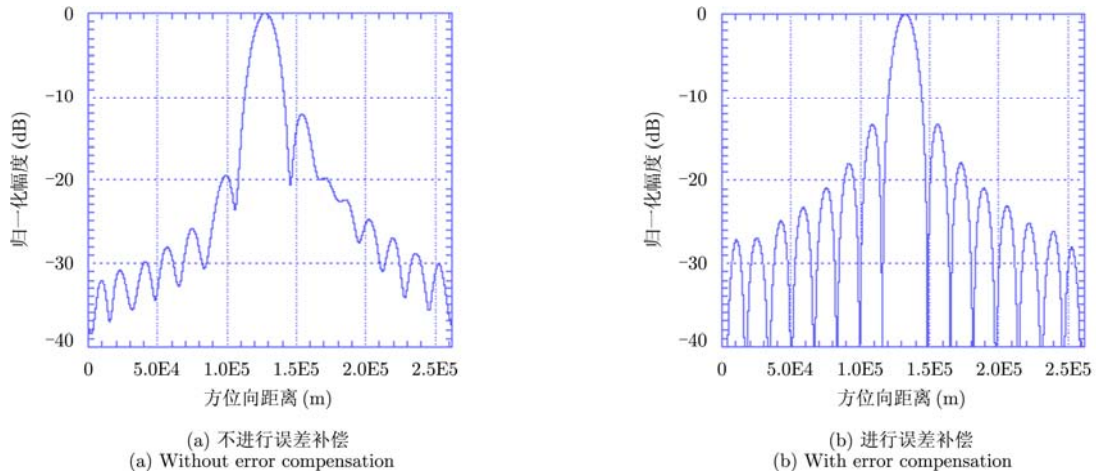


图 2 成像结果

Fig. 2 Image results

超高分辨率的星载 SAR 数据资源有限，为了反映后向散射特性随方位向观测角度和距离向频率的变化特性，本论文采用时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD)计算目标在不同方位观测角、不同频点下的电磁散射特性，为目标时空谱特性分析和后续融合成像算法研究提供高保真仿真数据源。FDTD 算法的主要思想是在空间轴和时间轴上对场量进行离散，并用中心差分代替

偏微分，将麦克斯韦方程组转化为差分方程，通过在时间轴和空间轴上采用蛙跳法(leapfrog)逐步推进求解，最终求得在一定边值与初值条件下的空间场解，该算法能够直接模拟场的分布，计算精度高，可求解任意形式的电磁场和电磁波<sup>[14]</sup>。将 FDTD 电磁散射计算方法同回波信号仿真模型相结合，可完成高保真度回波信号仿真，整个流程如图 3 所示。

利用上述仿真与成像方法,完成 X 波段下坦克目标的星载 SAR 回波仿真与成像处理如图 4 所示,其方位向与距离向理论分辨率为 0.3 m。可以看出,

在不同的方位观测角度下,坦克不同位置的散射特性存在显著差异,上述差异性是提高图像质量及目标识别、确认、描述能力的前提。

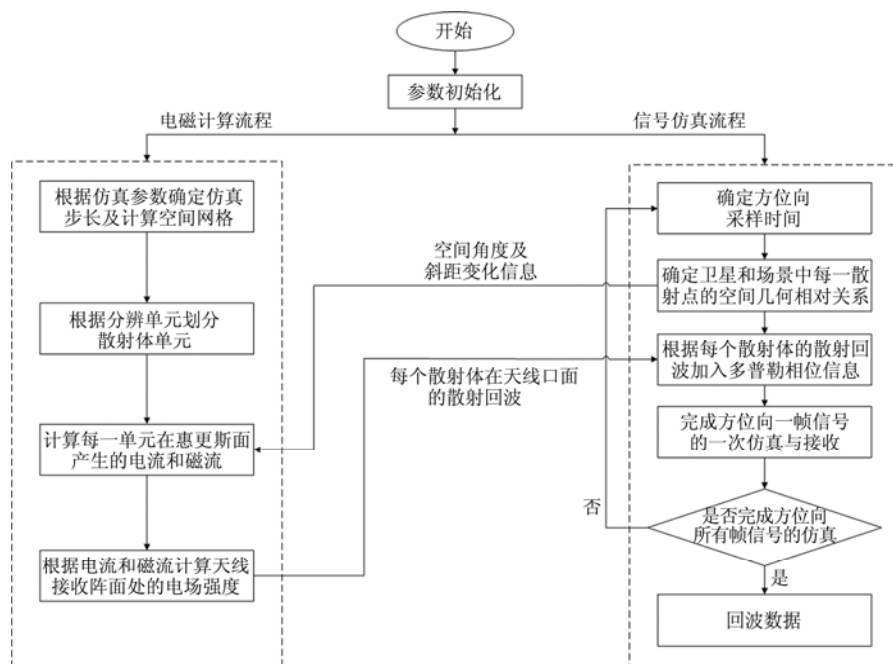


图 3 基于 FDTD 场景电磁散射特性计算的回波信号仿真流程图

Fig. 3 Diagram of SAR echo signal simulation based on FDTD

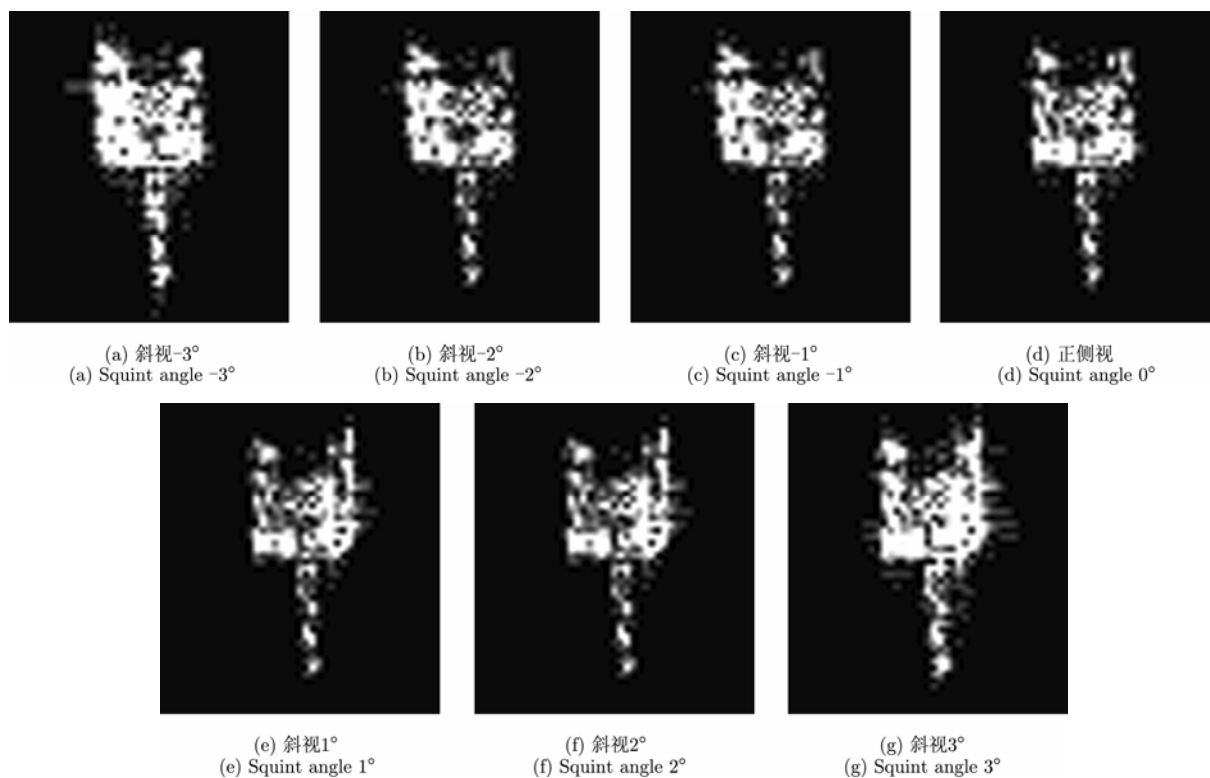


图 4 坦克仿真结果示意图

Fig. 4 Simulation result of tank

在此基础上，进一步对仿真结果的空间谱和时间谱特性进行分析，分析结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知，不同分辨率条件下同一目标时间谱存在显著差异，线性调频信号带宽越宽，分辨率越高，目标时间谱所含信息越多，越能够全面反映目标特性。图 6 分别给出了考虑散射特性随方位观测角变化和不随方位角变化时的目标空间谱特性，证明了

在高分辨率条件下，目标散射特性的空变特性不可忽略。

#### 4 融合成像处理策略和算法

如何在图像中充分利用目标的时空谱特性是未来高分辨率星载 SAR 数据处理所面临的重要问题。目前，关于多波段<sup>[15]</sup>、多极化<sup>[16]</sup>、多源信息<sup>[17]</sup>的融合处理方法较多，但面向目标时空谱特性的星

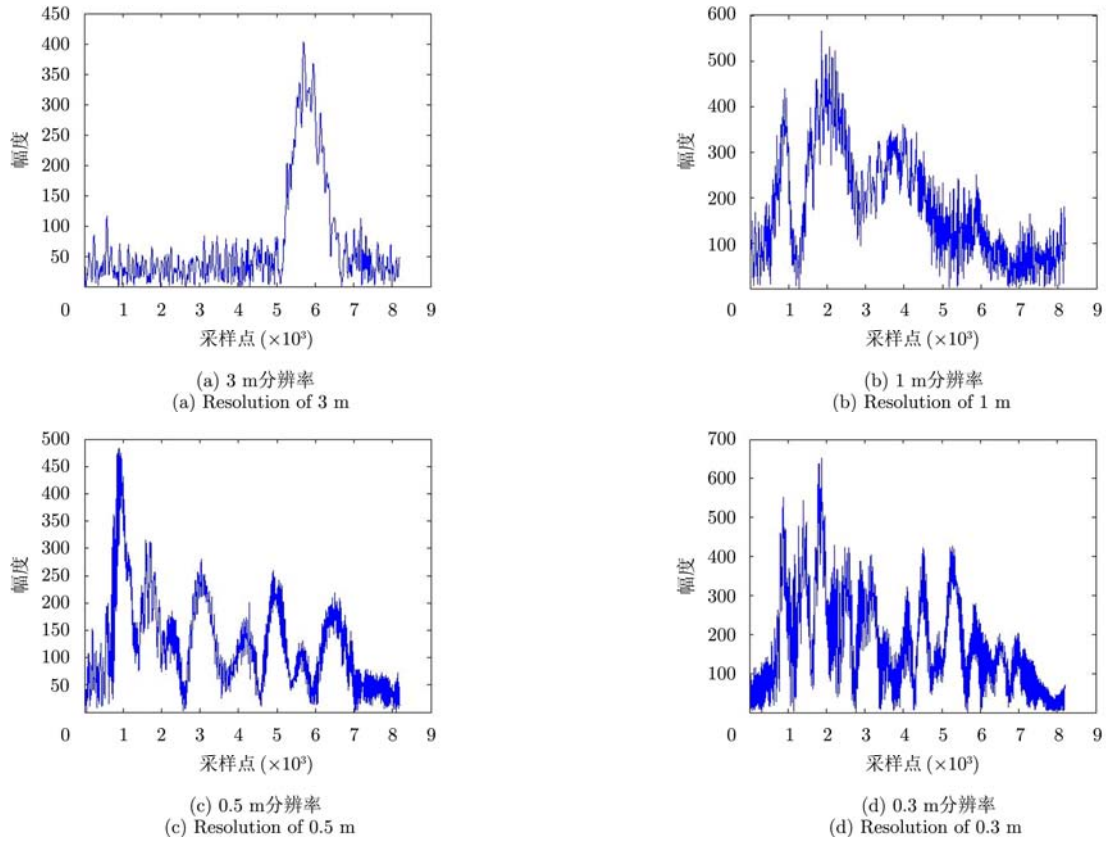


图 5 不同分辨率下的目标时间谱特性

Fig. 5 Time spectrum under different resolutions

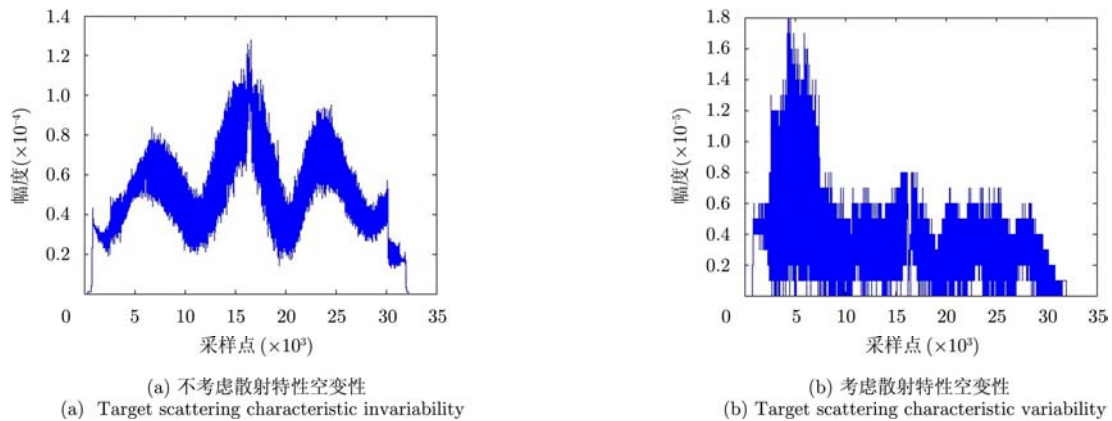


图 6 考虑和不考虑散射特性空变性时的目标空间谱特性

Fig. 6 Space spectrum with target scattering characteristic invariability/variability

载 SAR 融合处理算法仍处于初步探索研究阶段。2012 年, 德宇航人员利用“凝视成像”获取的回波数据开展了初步的融合成像算法研究, 发现通过对高分辨率星载 SAR 数据进行融合成像处理能显著提升目标的轮廓及细节信息。

超大方位角观测范围、高分辨率星载 SAR 系统利用其单次过顶时间长的优势, 对目标从不同的方位角度进行多次观测, 获得不同观测角度下的高分辨率星载 SAR 数据。本文针对高分辨率星载 SAR 回波信号处理提出一种融合成像处理算法, 在距离-多普勒域及图像域进行融合处理, 具体处理流程如图 7 所示。首先, 对不同方位向观测角 SAR 回波数据进行精确聚焦, 在距离多普勒域利用多视处理抑制图像斑点噪声, 提升图像的辐射质量; 其次, 进行几何校正处理, 将不同的方位向观测的 SAR 图像投影到地理经纬格上完成粗配准, 在此基础上通过 2 维匹配相关完成图像中目标的精细配准; 接着, 进行辐射校正处理, 补偿不同方位观测角条件下目标作用距离以及成像压缩增益的差异; 最后, 根据应用需求的不同按一定的准则完成图像的融合。图 7 给出了融合处理流程图。

本文所提融合方法的主要目标是突出图像的边缘信息, SAR 图像的连续边缘可能在某处由于噪声或者成像方式有“断点”, 对边缘信息有影响, 因此融合算法的第 1 步便是结合多角度 SAR 图像中经 Sobel 算法检测出的边缘信息确定真正的边缘, 排除意外情况对图像边缘的影响。意外情况对

边缘可能有两种影响: 第 1 种情况下, 本来连续的边缘可能由于噪声的影响出现了“断点”, 这种情况下需要从另外的图像中得到“断点”的真实信息, 判定究竟是真的有“断点”还是由于其它因素的影响; 另一种情况是, 由于意外因素的影响湮没了“断点”的存在信息, 需要从另外的图像中得到“断点”的真实信息, 判定是否是噪声覆盖了“断点”的存在或者成像方式影响了该点的信息。基于对这两种影响的考虑, 图像域融合的第 1 步先对多角度 SAR 图像的边缘信息进行提取和综合, 重建融合图像的边缘结构框架。以 3 个角度下观测到的多角度 SAR 图像为例, 设 3 幅图像的边缘信息依次为  $A, B, C$ , 此种重建方式类似于一种 3 人的投票表决, 当有两票以上时确定为边缘, 否则就认定为不是边缘。因为有可能对于某个点, 3 幅图像中两幅或以上都被意外因素湮没了真实信息, 所以这种处理方法并不能百分之百准确地综合出 3 幅图像中的边缘信息, 但能以比较大的可信概率重构出一个边缘信息的框架。这种表决方式如表 1 所示。结合真值表, 经过 3 幅图像的边缘综合后的重建边缘  $BW$  可以被表示为:

$$BW = AB + \bar{A}BC + A\bar{B}C \quad (3)$$

表 1 决策方式对应真值表

Tab. 1 Truth table of decision strategy

$A$	$B$	$C$	结果
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

在重建了图像边缘后, 需要对多角度图像按一定准则进行融合处理。对于边缘点, 在每个新的边缘像素点处, 3 幅图像表现出来的灰度值可能不相同, 图像融合的第 2 步即利用这些灰度值按照一定准则生成一个新的灰度值作为新的边缘像素点处图像灰度值。结合边缘处高对比度的特点, 必然有高灰度值向低灰度值或者低灰度值向高灰度值的显著变化, 因此需要判断边缘处像素点到底是属于高灰度值还是低灰度值。首先采用表 1 中的决策方法, 通过设定高灰度阈值和低灰度阈值, 判断出图

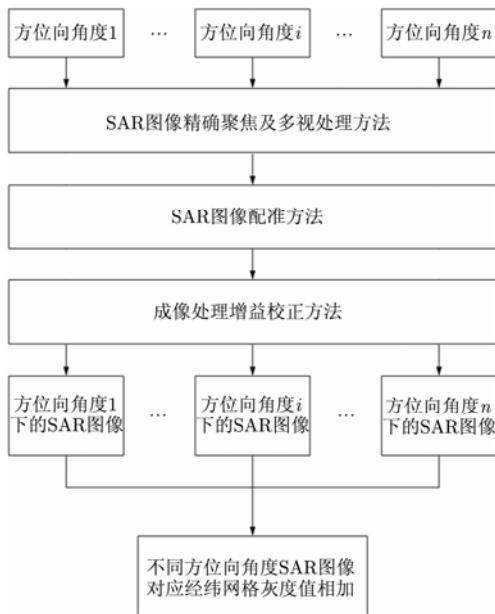


图 7 方位向多角度 SAR 图像融合处理流程

Fig. 7 Diagram of image fusion processing



像中的属于高灰度值的点或低灰度值的点。如果对于某点，3幅图像中有不少于两幅认定为“高点”，则该点为“高点”，不少于两幅认定为“低点”，则该点为“低点”。对于“高点”，取3幅图像中对应于该点灰度值中最大的值，对于“低点”，取3幅图像中对应于该点灰度值中最小的值，对于剩余的点，取3幅图像中对应于该点灰度值的中值。这种做法有利于将高、中、低3种灰度值拉开，提升边缘处的对比度，并且算法简单，运算量少。对于非边缘像素点处，本论文所提的融合算法采用了均值滤波的方法，对每个像元的灰度值取3幅图像中对应点的像素值的平均值以抑制白噪声。

### 5 实验验证

为验证本文方法的有效性，本节利用美国 Sandia 实验室机载飞行试验获取的不同方位观测角的真实 SAR 图像，读取图像中场景的后向散射系数作为场景仿真输入，并结合 TerrSAR-X 卫星的轨道参数进行高分辨率星载 SAR 回波信号仿真，获取回波数据。对仿真数据进行精确聚焦及多视处理后，得到不同方位角度观测的3幅 SAR 图像，如图8所示。分别对3幅 SAR 图像进行辐射校正及几何配准后，利用本论文所提的融合准则，对3幅 SAR 图像进行融合，结果如图9所示。

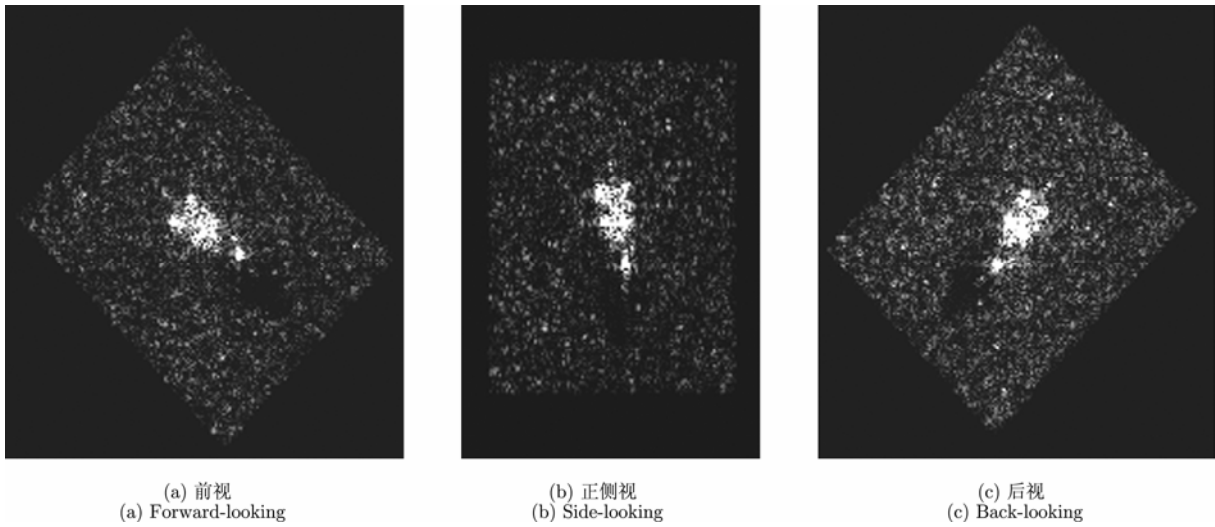


图8 方位向多角度配准后结果(T-72 坦克)

Fig. 8 Registration results of image in different observation angle (T-72 tank)

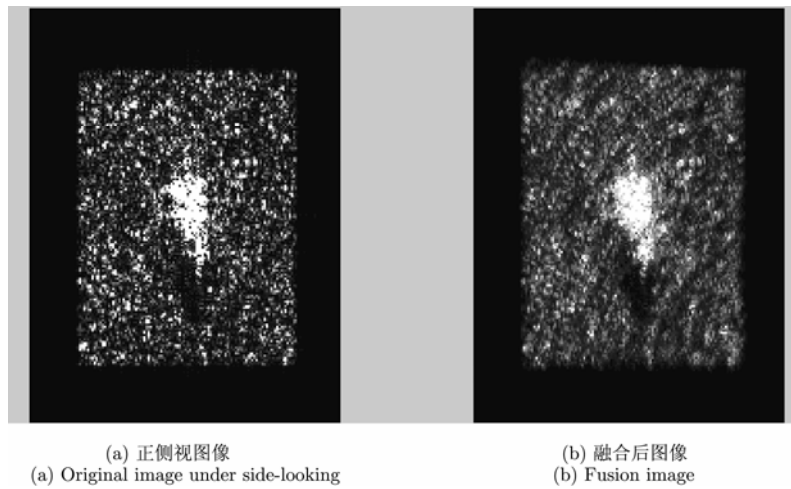


图9 融合后图像与正侧视单幅图像对比

Fig. 9 Comparison of original image and fusion image

从图9中可以看出,目标区域噪声变小,目标对比度增强,边缘更明显。为验证融合后图像在目标识别等方面的提升效果,本论文分别对融合前、后的SAR图像进行了边缘检测,结果如图10,图11所示。从图11中可以看出,经过融合后的边缘

信息更加丰富,目标轮廓更为清晰,有利于目标的识别、确认与描述。

最后,本文利用SAR图像的信息熵对融合前和融合后的图像进行量化分析,结果如表2所示。

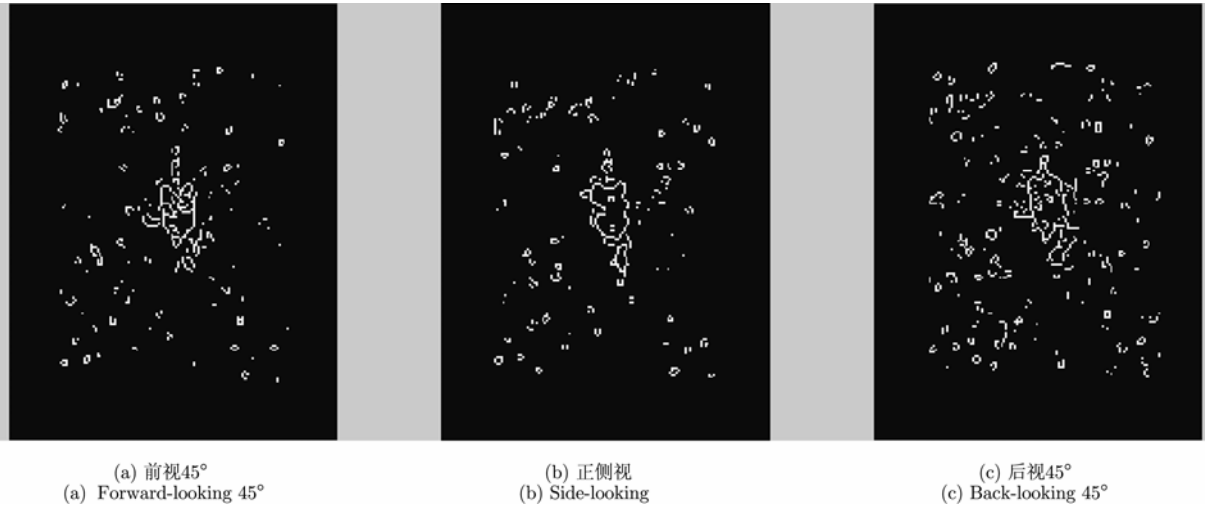


图10 融合前图像检测出的边缘

Fig. 10 Extracted edge of original image

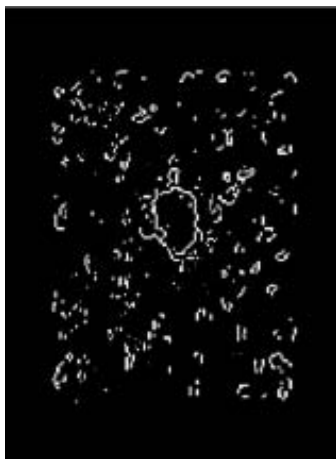


图11 融合图像检测出的边缘

Fig. 11 Extracted edge of fusion image

表2 融合前和融合后图像信息熵

Tab. 2 Information entropy of original image and fusion image

图像	前斜视	正侧视	后斜视	融合后图像
信息熵 (bit)	4.1329	3.8514	4.2951	4.9881

由表2可以看出,融合处理后,图像信息熵变大,这意味着融合后图像蕴含了更多目标信息,更加有利于反映目标的轮廓和细节。

## 6 结论

本文瞄准高分辨率星载SAR目标特性提取问题,提出了一种融合成像处理的新思路与方法。首先分析了高分辨率条件下影响目标特性提取及图像质量的主要因素,并结合3步成像处理算法框架给出了补偿方法。在此基础上,结合目标散射特性的时-空-频变化特性,提出了目标时空谱的概念,完成了回波信号数学建模。以该模型为基础,结合FDTD电磁散射计算方法提出一种能反映目标RCS变化的高逼真度回波信号仿真方法,完成典型军事目标的高精度仿真。最后,提出了一种针对高分辨率、大方位观测角范围的融合成像处理算法,通过多视处理、辐射校正、精确配准、融合处理等操作,降低SAR图像斑点噪声,提升目标轮廓和细节信息。实验结果表明,相比于融合前的SAR图像,融合处理后图像噪声变小,边缘轮廓信息更加清晰,有利于后续SAR图像精细解译与判读。

## 参考文献

- [1] Prats-Iraola P, Scheiber R, Rodriguez-Cassola M, *et al.* High precision SAR focusing of TerraSAR-X experimental staring spotlight data[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany, 2012: 3576-3579.



- [2] Mittermayer J, Wollstadt S, Prats-Iraola P, *et al.* Staring spotlight imaging with TerraSAR-X[C]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Munich, Germany, 2012: 1606-1609.
- [3] Mittermayer J, Wollstadt S, Prats-Iraola P, *et al.* The TerraSAR-X staring spotlight mode concept[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3695-3706.
- [4] Kim J-h, Heer C, and Schaefer C. Astrium technology development for next generation SAR[C]. 2013 IEEE International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, Japan, 2013: 24-26.
- [5] Gantert S, Kern A, Düring R, *et al.* The future of X-band SAR: TerraSAR-X next generation and WorldSAR constellation[C]. 2013 IEEE International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Tsukuba, Japan, 2013: 20-23.
- [6] Gantert S, Kern A, Düring R, *et al.* TERRASAR-X next generation—program overview[C]. 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Quebec, Canada, 2014: 1-4.
- [7] 林世斌, 李悦丽, 严少石, 等. 平地假设对合成孔径雷达时域算法成像质量的影响研究[J]. *雷达学报*, 2012, 1(3): 309-313. Lin Shi-bin, Li Yue-li, Yan Shao-shi, *et al.* Study of effects of flat surface assumption to synthetic aperture radar time-domain algorithms imaging quality[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(3): 309-313.
- [8] Gunning G and Wong H. Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm and Implementation[M]. Beijing: Electronic Industries Press, 2007: 155-191.
- [9] Lanari R and Hensley S. Chirp z-transform based SPECAN approach for phase-preserving ScanSAR image generation[J]. *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1998, 145(5): 254-261.
- [10] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [11] Bamler R. A comparison of range-Doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706-713.
- [12] Prats-Iraola P, Scheiber R, Rodriguez-Cassola M, *et al.* On the processing of very high resolution spaceborne SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6003-6016.
- [13] Yang W, Chen J, Zeng H C, *et al.* A novel three-step image formation scheme for unified focusing on spaceborne SAR data[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2013, 137: 621-642.
- [14] Jiang Yan-nan, *et al.* FDTD application of targets electromagnetic scattering in layered space[J]. *Telkonnika Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2013, 11(12): 7682-7688.
- [15] Li X, Song J, and Sun Y. Information and Communication Technology for Education (2 Volume Set): Multi-band SAR image fusion study based on NSCT and PCNN[M]. Hong Kong Education Society, Hong Kong, 2014, DOI: 10.2495/ICTE130571.
- [16] Yang Zhi-xiang. Application of fusion of multi-polarization SAR images in investigation of coastal tidal flats[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(5): 52-60.
- [17] Benediktsson J A, Swain P H, and Ersoy O K. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 540-551.

## 作者简介



杨 威(1983-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 北京航空航天大学信号与信息处理专业, 主要从事星载 SAR 高分辨率雷达信号仿真与成像技术、新体制雷达技术的研究。

E-mail: yangweigigi@ee.buaa.edu.cn



陈 杰(1973-), 教授、博士生导师, 长期从事高分辨率微波遥感信息系统理论与方法研究。2005 年获得北京市高等教育成果二等奖, 2006 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”, 2008 年获霍英东教育基金会第十一届高等院校青年教师奖三等奖。承担国家自然科

学基金、“973”计划、“863”计划、国家重大专项等多项课题。已发表论文 100 余篇, 其中 SCI(E)检索 15 篇, EI 检索 80 余篇。申请国家发明专利 20 余项, 合作编写教材 4 部, 合作出版译著 1 部。



李春升(1963-), 男, 天津人, 北京航空航天大学, 教授, 博士生导师, 主要从事星载 SAR 系统总体与仿真、多源遥感图像信息融合、信息获取与处理等方面的研究工作。

E-mail: lichunsheng@buaa.edu.cn