

DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2018.03.003

宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像方案研究

江 烨¹, 李 勇^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏南京 211106;
2. 南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 江苏南京 211106)

摘要: 环视扫描合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)可以实现广域观测, 但测绘带宽受到最小天线面积的限制, 对此提出了一种宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像方案。该方案引入了 ScanSAR 的波束扫描思想, 在雷达天线作圆锥扫描的同时, 由近及远地对多个距离子带进行分时扫描。给出了天线在这种扫描方式下的驻留时间分配准则, 分析了成像参数间的依赖关系。基于子孔径成像、几何失真校正和图像拼接的一系列成像算法对该宽测绘带方案进行了点目标和面目标仿真实验, 结果表明在保证成像质量的前提下, 测绘带宽能得到显著的增加。

关键词: 星载合成孔径雷达; 环视扫描模式; 扫描合成孔径雷达; 宽测绘带

中图分类号: TN959.74 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2018)03-0249-07

Study on Wide Swath Imaging Method for Spaceborne Circular-Scanning SAR

JIANG Ye¹, LI Yong^{1,2}

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Circular-scanning synthetic aperture radar can observe the scene information on both sides of the track simultaneously, but the mapping bandwidth is limited to the minimum SAR antenna area. A wide swath spaceborne circular-scanning SAR imaging method is proposed. As the antenna scans conically, it also scans periodically in each strip to get wider swath. The strip residence time distribution rule and imaging parameters of this mode are discussed. A series of imaging algorithm, including sub-aperture imaging, geometric distortion correction and image mosaicking, is applied to the point target and the distributed targets simulation experiments. The imaging results show that under the premise of good image quality, the swath gets significantly increased.

Key words: spaceborne synthetic aperture radar (SAR); circular-scanning mode; ScanSAR; wide swath

0 引言

环视扫描合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种能够实现广域观测的新模式 SAR。不同于条带、聚束等经典模式只能获得沿航迹一侧的场景信息, 环视扫描 SAR 的天线以地面垂线为轴线作 360°圆锥扫描, 能对飞行航迹下方的环状区域进行高效观测。这种模式虽然增加

了雷达的可观测范围, 却仍然受到传统 SAR 系统的最小天线面积约束, 即高分辨率和宽测绘带的指标不能同时满足, 由于星载 SAR 的轨道高、飞行速度快, 这一问题较之机载 SAR 更为突出。

宽测绘带一直是 SAR 技术的重要研究方向, 采用经典的条带工作模式很难达到测绘应用中带宽几百公里的要求, 对此需要研究出新的扫描模式或工作体制。其中多通道技术在高分辨率宽测绘带雷达上得到了广泛应用, 文献[1]提出采用方

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-10-13

基金项目: 航空科学基金(No. 2014Z052020); 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(No. kfjj20160405); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

位多波束解多普勒模糊实现了宽测绘带;文献[2]提出了多维波形编码与数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术相结合的方法;文献[3]提出了一种方位向多波束和距离向多层次扫描结合的新型工作模式(MAB-ScanSAR),还有一些学者也提供了类似的解决方案^[4-6],基本思想都是基于DBF技术的多发多收模式,虽然有效,但缺点是对系统要求高且信号处理过程复杂。而单发单收体制雷达中扫描模式SAR(ScanSAR)^[7]仍然是实现宽测绘带最经典而高效的方法,在这种工作模式下,雷达平台沿航迹飞行时,对距离向上的多个子带进行周期性扫描,使得测绘带宽实现了相对于条带模式几倍的扩展,但同时也要付出牺牲方位向分辨率的代价。

本文将在机载环视扫描SAR的研究基础之上,探索引入ScanSAR工作特点的宽测绘带星载环视扫描SAR成像方案,特别是,通过合理地设置天线扫描速度和划分子孔径成像,可以达到不损失方位向分辨率而测绘带宽提升的效果。

1 星载环视扫描 SAR 几何模型

星载环视扫描SAR的几何关系如图1所示。

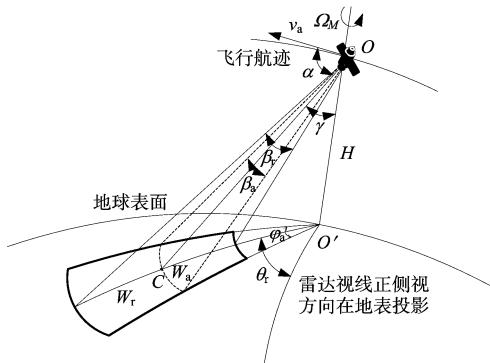


图 1 星载环视扫描 SAR 数据采集几何模型

卫星以速度 v_a 沿轨道飞行,假设零时刻卫星位于 O 点,星下点位于 O' 点,飞行高度为 H ,瞄准点(波束中心与地表的交点)位于 C 点,下视角为 γ ,多普勒锥角为 α ,地平面斜视角为 θ_r ;卫星飞行过程中天线匀速旋转,扫描航迹下方环状区域,扫描速度为 Ω_M ,设定顺时针转动 θ_r 为负,反之为正; β_r, β_a 分别为距离向波束宽度和方位向波束宽度,波束地面足印可近似为一个扇形区域(实际为椭圆),扇形弧对应的圆心角为 φ_a 。对此有

$$\left\{ \begin{array}{l} W_a \approx \beta_a \cdot |OC| \\ W_r = R_e \cdot \left\{ \arcsin \left[\frac{R_e + H}{R_e} \sin \left(\gamma + \frac{\beta_r}{2} \right) \right] - \right. \\ \quad \left. \arcsin \left[\frac{R_e + H}{R_e} \sin \left(\gamma - \frac{\beta_r}{2} \right) \right] - \beta_r \right\} \\ \varphi_a \approx 2 \arcsin \left[\sin(\beta_a/2) / \sin \gamma \right] \end{array} \right. \quad (1)$$

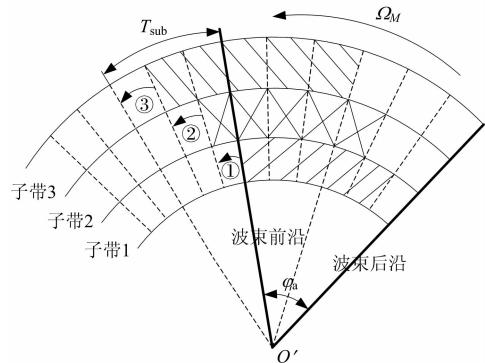
式中, W_a 为方位向瞬时覆盖宽度, W_r 为距离向测绘带宽度, R_e 为地球半径。X 波段星载 SAR 在轨道高度 475 km、常用下视角 $10^\circ \sim 60^\circ$ 时, 测绘带宽为 $10 \sim 40$ km, 可见传统环视扫描模式的测绘带宽远达不到宽测绘带的标准。

2 结合 ScanSAR 的成像模式设计

环视扫描 SAR 与条带模式 SAR 一样, 在扫描过程中只能形成一个测绘带, 而 ScanSAR 通过周期性地切换天线俯仰角可以生成若干个子带, 使 SAR 的测绘带宽得到几倍的增长。波束扫过所有子带完成一次循环的回归时间记为 T_R , 两个回归时间之间的波束覆盖区若适当重叠, 则可以生成连续图像。在第 i 个子带内的驻留时间记为 T_{bi} , 若忽略天线波束指向的切换时间, 且假设每个子带的驻留时间相同, 则有 $T_R = N_s \cdot T_b$, N_s 为子带数。各子带的回波信号作全孔径聚焦处理后, 经辐射校正和图像拼接可得到完整的 SAR 成像结果。

借鉴 ScanSAR 的扫描思想, 令环视扫描 SAR 的天线在作圆锥扫描的同时, 也在各个子带间周期性切换。 $N_s=3$ 的扫描时序如图 2 所示, 将 N_s 个子带合成的整个测绘带看作由一个宽波束照射而成, φ_a 对应的扇形为合成的宽波束照射区。因此, 这种新环视扫描模式下的成像核心仍然是划分子孔径成像, 其基本思路是选取相邻两个子孔径的共同成像区域等效为聚束照射区域。图 2(a) 中步骤①~③完成第一个子孔径时间 T_{sub} 的照射, 图 2(b) 中④~⑥完成下一个子孔径时间的照射, 波束指向按图中数字标记在 3 个测绘带之间交替进行, 阴影区为每次扫描各子带的完全照射区域, 可以看出相邻子成像区有重叠, 达到分辨率均匀的基本要求。因为照射邻近子带所需成像参数差异较小, 此时假设每个子带的驻留时间相等, 即 $T_b = T_{sub}/N_s$ 。这种处理方式也将 ScanSAR 中的

回归时间和环视扫描 SAR 中的子孔径时间相联系,有 $T_R = T_{\text{sub}}$,且最终测绘带宽近似为传统环视扫描 SAR 的 N_s 倍。



(a) 第一个子孔径时间扫描情况

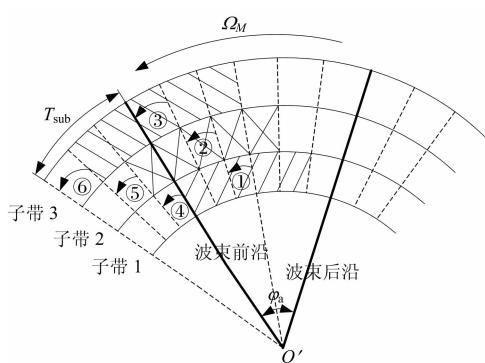


图 2 天线扫描示意图

由于子带共享子合成孔径时间,方位向分辨率降为预设的 N_s 倍。即预设子带方位分辨率为 ρ_a 时,由

$$\rho_a = \frac{\lambda}{2\Delta\theta} \quad (2)$$

得到

$$\Delta\theta_{\text{sub}} = \frac{N_s \lambda}{2\rho_a} \quad (3)$$

式中, λ 为波长, $\Delta\theta_{\text{sub}}$ 为满足预设方位分辨率时雷达相对于目标的总转角。由雷达相对于成像区场景中心的等效转角速度 $\Omega_0 = \frac{v_a \sin \alpha}{|OC|}$, 推导出相干积累时间, 即子孔径时间 T_{sub} 为

$$T_{\text{sub}} = \frac{\Delta\theta_{\text{sub}}}{\Omega_0} = \frac{N_s \lambda}{2\rho_a} \cdot \frac{|OC|}{v_a \sin \alpha} \quad (4)$$

式中, α 为多普勒锥角:

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{v}_a \cdot \vec{OC}}{|\vec{v}_a| \times |\vec{OC}|} \quad (5)$$

图 3 为合成的宽波束地面足印扫描几何图,由于卫星高速向前飞行,瞄准点连线在地面呈螺旋状分布。

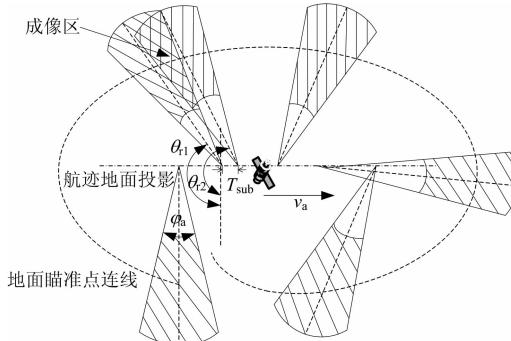


图 3 雷达波束地面足印扫描几何

定义波束地面斜视角 θ_r 以刻画扫描情况, 在一个 T_{sub} 时间内, θ_r 由 θ_{rl} 增加到 θ_{r2} , 且有 $|\theta_{r2}| - |\theta_{rl}| = \Omega_M \cdot T_{\text{sub}}$ 。图中的斜线交叉区为两个子孔径时间的公共成像区, 其覆盖面积由天线扫描角速度 Ω_M 决定, 若天线扫描速度过大, 则公共区较小, 相邻的成像区之间会存在场景间断; 若天线扫描速度过小, 则公共区较大, 又致使大面积的场景重叠, 这两种情况都不利于后续的图像拼接。在满足方位向分辨率要求的一个 T_{sub} 时间内, 令天线恰好扫过波束足印宽度 φ_a 的一半可以使相邻成像区之间既不存在间断也不出现重叠现象, 成像效率达到最高, 即令

$$|\theta_{r2}| - |\theta_{rl}| = \frac{\varphi_a}{2} \quad (6)$$

综合式(4)、式(5)、式(6), 可得

$$\Omega_M = \frac{\Omega_0 \cdot \varphi_a \cdot \rho_a}{N_s \cdot \lambda} \quad (7)$$

理论上说, Ω_M 是时变的, 也就是天线必须非匀速旋转扫描。这有两方面原因, 其一是 Ω_0 表征了相对于每一个子成像区中心的等效旋转角速度, 它随时间变化; 其二是 SAR 的方位分辨率 ρ_a 与多普勒锥角 α 有关, 聚束照射模式下回波信号的多普勒带宽近似为

$$B_d = \frac{2 \cdot W_a \cdot v_a \sin \alpha}{\lambda \cdot |OC|} \quad (8)$$

α 越小, B_d 越小, 因此 ρ_a 随着斜视角的增大而恶化, 若要使整个图像的分辨率均匀, 此时天线也必须作非匀速旋转。由式(7)可知为使图像达到相同的 ρ_a , 斜视情况下的天线旋转角速度应比正侧

视情况下更慢。考虑到实际雷达系统实现这一条件的复杂性,以及本文重点在于成像方案和算法的验证,仿真中仍采用固定旋转角速度。

3 成像处理流程

图 4 为完整的成像算法流程,包括每个子带的子图成像、几何失真校正和图像拼接。考虑到单个子带的处理流程在机载和弹载 SAR 中已有应用^[8-9],下文主要将其扩展至星载 SAR 成像处理。

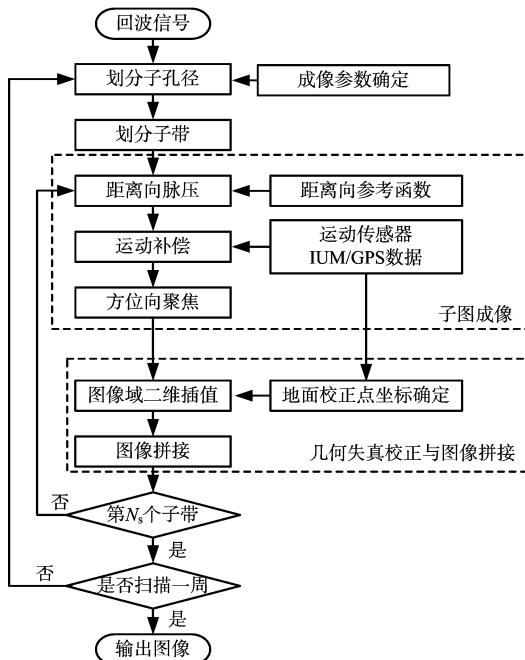


图 4 宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像算法流程图

3.1 子图成像算法

子图的聚焦处理采用基于转台原理的线性距离多普勒(LRD)算法,它不仅能够稳定地实现大斜视角成像,并且计算量小、实时性高。LRD 算法各步骤功能如下:

- 1) 距离脉压,完成距离向的匹配滤波;
- 2) 空不变运动补偿,包括逐脉冲的距离对准(一般以成像区中心点为参考点)和相位补偿两部分;
- 3) 方位聚焦,经过方位 FFT 得到聚焦后的距离多普勒域 SAR 图像。

其中最为关键的步骤是运动补偿,这种以固定点为参考的运动补偿使得该算法具有一定局限性,即对除了成像区中心点外各点的运动补偿存

在残余空变误差,且误差随成像区尺寸和斜视角的增大而恶化,聚焦质量会受到影响。本文所提宽测绘带成像方案主要用于对大面积地表的观测,分辨率要求通常在几十米量级,故由 LRD 算法带来的成像误差可以暂时忽略不计。

3.2 几何失真校正

图像几何失真指成像结果不是地面散射点分布的真实反映,它通常受到雷达平台高度、波束视角及斜视角等诸多因素的影响,因此,成像结果的几何失真校正应以逐点校正为基础,校正过程如下:

- 1) 在成像区域内设置等间距的地面校正网格点,如图 5 所示。校正点坐标以地心惯性坐标系为基准,相邻点间隔按照图像分辨率(地距)要求放置。

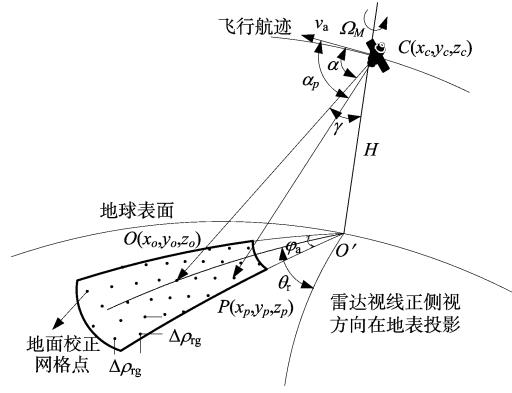


图 5 地面校正网格点分布

- 2) 逐点判断校正点是否在当前波束照射范围内,若在,根据距离多普勒方程解算出该点在对应子图中的位置。

设任意校正点 P 在地心惯性坐标系下的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,子孔径中心时刻雷达天线相位中心(APC)的坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。用 LRD 算法成像, P 点在成像结果中的距离向坐标 N_{rp} 取决于该点与参考点相对于孔径中心时刻 APC 的距离之差,即

$$N_{rp} = \frac{|CP| - |CO|}{p_r} \quad (9)$$

式中, $p_r = \frac{c}{2f_s}$ 为距离向采样间隔。

P 点的方位向坐标 N_{ap} 取决于该点与参考点相对于 APC 的多普勒频率之差,即

$$\begin{cases} N_{ap} = \frac{f_{dp} - f_{do}}{\Delta_{fd}} \\ f_{dp} = -\frac{2dr}{\lambda dt} = -\frac{2}{\lambda} v_a \cos \alpha_p \\ f_{do} = -\frac{2dr}{\lambda dt} = -\frac{2}{\lambda} v_a \cos \alpha_p \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\Delta_{fd} = \frac{PRF}{N_{sub}}$ 为方位向量化间隔, N_{sub} 为子图的方位向采样点数。

3) 在子图中将 (N_{ap}, N_{rp}) 位置的信号取出, 通常 (N_{ap}, N_{rp}) 不会是整数, 要经过插值操作将信号放入校正点 (x_p, y_p, z_p) 对应的图像矩阵位置上, 成像区内所有校正点都要进行以上坐标定位换算, 直到得到全部分辨单元 $(x_p, y_p, z_p) \Rightarrow (N_{ap}, N_{rp})$ 的对应关系, 完成几何失真校正。

3.3 环形图像拼接

以上操作得到了校正后的子图, 最终的成像结果需进行子图的拼接, 为了实现“边扫描边成像”并降低中间存储量, 图像拼接采用与几何失真校正相结合的方式, 具体操作如下:

1) 根据星载 SAR 系统的已知参数, 预先计算出天线扫描一周所覆盖的地面面积, 并通过在此范围内铺设校正点来确定最终输出图像的大小和每个像素点对应的地理坐标位置。

2) 子图成像后, 根据 3.2 节校正单个子图的几何失真, 同时将逐像素点得到的校正值直接放入 1) 中完整输出图像的对应位置。

3) 随着相邻的子图完成校正和存储, 最终的环形图像也在这个过程中连续形成, 任何时刻的中间成像结果都可以实时输出。

4 仿真与分析

结合具体轨道参数对提出的宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像方案进行点目标和面目标仿真验证。轨道参数如下: 长半轴 6 585 km, 偏心率 0.0011, 轨道倾角 23.2°, 近地点幅角 90°, 升交点赤经 0°, 轨道高度 475.7 km。

点目标仿真中使用的 X 波段 SAR 系统参数如表 1 所示, 雷达天线以固定角速度 Ω_M 顺时针扫描下视角为 10.4°、14.2° 和 18° 的 3 个子带, 在地表相距 2 km 放置的点目标相继进入波束照射范围

内。为了直观地看出各子带, 特意设置子带间没有重叠。成像处理时将全孔径数据分成 187 个子孔径, 子孔径数据经过 LRD 处理, 中间子带在一个扫描周期中的 12 帧子图如图 6 所示。显然, 所用 LRD 算法能够实现任意天线波束指向的图像聚焦, 但存在明显的几何失真和斜视角旋转(除正侧视方向), 不能直接用于环形图像的拼接输出, 且失真程度随斜视角的增大而恶化, 还发生了“卷绕”现象, 因此在使用式(10)计算校正点坐标时要注意“解模糊”的问题^[9]。

表 1 X 波段星载环视扫描 SAR 系统参数

系统参数	取值
线性调频信号带宽	9 MHz
信号采样率	12 MHz
脉冲重复频率	12 000 Hz
方位向波束宽度	1.2°
距离向波束宽度	3.8°
雷达下视角	10.4°, 14.2°, 18°
天线旋转角速度	31.45°/s
图像分辨率(方位×距离)	50 m×50 m

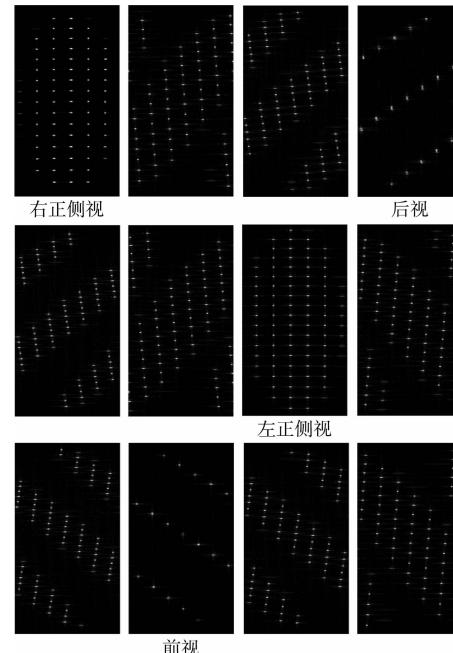
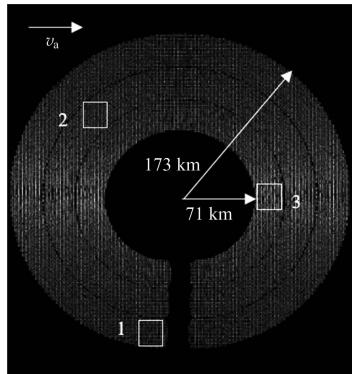


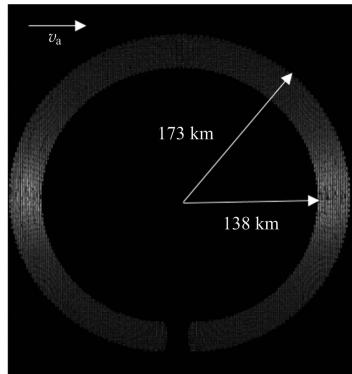
图 6 雷达扫描一周得到的 12 个子图

图 7(a)为完成了几何失真校正的完整拼接图像, 内外径分别为 173 km 和 71 km, 总测绘带宽达到 102 km。同时图 7(b)也给出了传统环视扫描 SAR 以下视角 18° 扫描一周的成像结果, 可见利用本文提出的方法, 在子孔径时间内进行三层扫描

使得测绘带宽得到了两倍的增加。图 7(a)中矩形框 1 所示正侧视校正放大图如图 8(a)所示,各点目标聚焦良好且被校正到大地坐标系下。图 8(b)为矩形框 2 所示斜视校正放大图,几何失真校正处理完成了解卷绕,斜视角旋转得以恢复,且各点目标符合预设位置和分布,但由于是斜视成像,分辨率有所下降;图 8(c)为矩形框 3 所示前视校正放大图,此时距离信息完全与多普勒信息耦合,因此校正结果也只能区分距离远近,无法分辨方位向,但点目标在距离向上仍保持了均匀分布的特点。

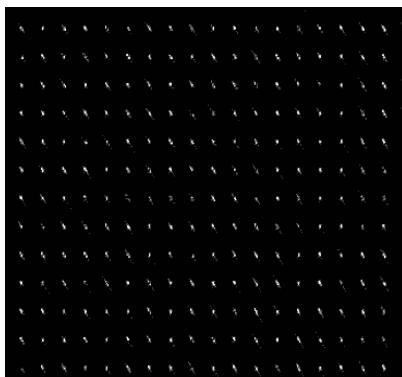


(a) 本文提出方法

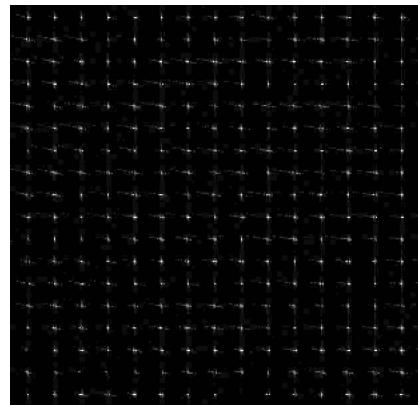


(b) 传统环视扫描方法

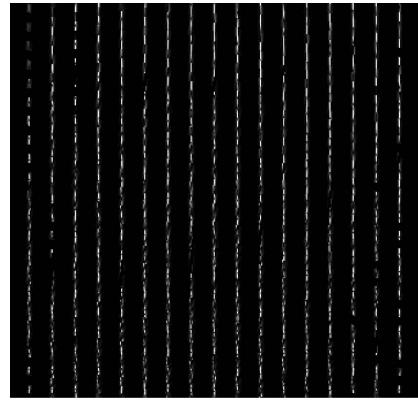
图 7 点目标成像结果



(a) 正侧视



(b) 斜视



(c) 前视

图 8 几何失真校正后局部放大图

为进一步检验图像拼接效果,考虑利用一种基于图像逆成像处理的高效回波模拟方法来进行面目标仿真^[10]。地面场景用日本 ALOS-2 采集的熊本地震数据来模拟,如图 9 所示,场景中相邻像素间隔设为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。仿真扫描了高度 475 km 轨道上下视角为 $20^\circ \sim 35^\circ$ 的 6 个子带,同点目标仿真一样,设置子带间没有重叠,成像区内外径分别为 362 km 和 160 km,即测绘带宽达到 202 km。图 10 为成像中间结果,由图 10(c)扫描一周的情况可见,没有出现折叠和错位等现象,相邻子孔径场景连续变化,只是在航迹前后方区域,受雷达体制限制,无法实现方位高分辨率。图 9 和图 10(c)中矩形框的放大图如图 11(a)和 11(b)所示,可见多处强散射点聚焦质量良好,散射特性相似,目标相对位置准确且由图中的铁轨可知没有明显的形变,说明了本文方法对面目标成像的有效性。实际应用中为了图像的拼接效果,可以设置各子带的照射范围有部分重叠,成像结果中的黑线即可消去。

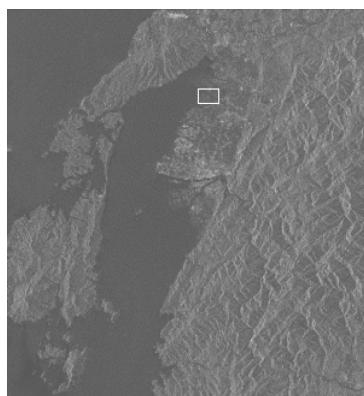


图 9 原始 SAR 图像



(a) 图 9 中矩形框



(b) 图 10(c)中矩形框

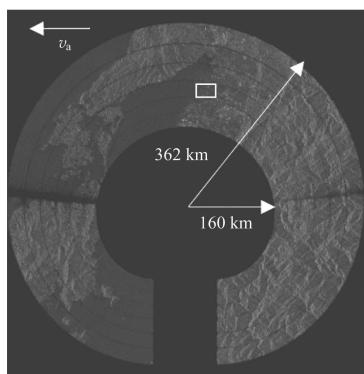
图 11 放大图



(a) 扫描 1/3 周



(b) 扫描 2/3 周



(c) 扫描 1 周

图 10 面目标成像中间结果

5 结束语

针对传统星载环视扫描 SAR 成像模式观测范围十分有限的情况,结合 ScanSAR 模式,研究了在子带间分配合成孔径时间的宽测绘带扫描模式和成像方案。点目标和面目标仿真实验验证了本文所提方案的有效性,与传统环视扫描模式相比,在保证成像质量的前提下能够实现测绘带数倍的扩展,为大面积海洋观测和植被测绘等实际应用提供了一定的依据。仿真中所采用的 LRD 算法仅用于本方案有效性的验证,未来可以研究更高分辨率的宽测绘带星载环视扫描 SAR 成像算法。

参考文献:

- [1] WANG Robert, WANG Wei, SHAO Yunfeng, et al. First Bistatic Demonstration of Digital Beamforming in Elevation with TerraSAR-X as an Illuminator [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(2):842-849.
- [2] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Multidimensional Waveform Encoding: A New Digital Beamforming Technique for Radar Remote Sensing [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1):31-46.

(下转第 266 页)