

一种斜视滑动聚束 SAR 子孔径处理成像方法

张劲东¹ 陈家瑞² 朱岱寅¹ 邱晓燕¹ 唐笑为¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 中国船舶重工集团公司第七二三研究所, 扬州, 225001)

摘要: 子孔径法是解决滑动聚束 SAR 成像方位频谱混叠的有效方法, 具有内存占用率低、灵活性高的特点。子孔径的划分不仅影响成像质量, 还会影响成像效率; 但目前子孔径的划分大多采用经验值, 理论上并没有给出明确分析。因此在斜视成像过程中, 未合理划分的子孔径会导致拼接谱出现“空隙”现象。本文首先介绍了斜视滑动聚束 SAR 工作模型, 分析了其方位多普勒历程, 提出了斜视下基于方位频域 Scaling 的子孔径成像算法。根据相邻子孔径的二维频谱, 研究了子孔径频谱拼接的准则, 推导了确定子孔径长度与重叠率的解析式, 给出了子孔径划分的流程, 最后通过仿真实验和实测数据处理验证了子孔径划分方法及斜视下成像算法的有效性。

关键词: 滑动聚束 SAR; 频谱混叠; 子孔径划分; 斜视

中图分类号: TN959.3 **文献标志码:** A

Imaging Method for Sub-aperture Processing for Squinted Sliding Spotlight SAR

Zhang Jindong¹, Chen Jiarui², Zhu Daiyin¹, Qiu Xiaoyan¹, Tang Xiaowei¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. The 723 Institute, China Shipbuilding Industry Company, Yangzhou, 225001, China)

Abstract: In the advantages of low memory requirement and high flexibility, sub-aperture method is effective in solving the problem of azimuth spectrum aliasing in sliding spotlight SAR imaging. Image quality and imaging efficiency are affected by sub-aperture partition. However, sub-aperture division usually relies on experience value, which cannot be given with a clear theory analysis at present. Therefore, spectrum gaps may appear in the squint imaging processing if sub-apertures are not properly divided. First, we introduce sliding spotlight SAR model and analyze its Doppler frequency history. A sub-aperture imaging algorithm for squinted sliding spotlight SAR is proposed based on azimuth frequency domain scaling. Then according to two-dimensional spectrum of the adjacent sub-apertures, we investigate the sub-aperture spectrum stitching principle and derive the two equations, thus determine sub-aperture length and overlap rate. Afterward the flow for partitioning sub-apertures is given. Finally, effectiveness of the sub-aperture partition method and squinted imaging algorithm is verified by simulation experiments and real data.

Key words: sliding spotlight SAR; spectrum aliasing; sub-aperture partition; squint

引言

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)成像是一种全天时、全天候的微波成像技术,在军用和民用领域都有着重大的作用^[1-2]。由于对合成孔径雷达技术在各种情况下应用的不断追求,目前已经发展出了多种不同工作模式下的 SAR 系统。传统的 SAR 有两种常见的工作模式:条带模式和聚束模式。随着 SAR 成像技术的不断发展,结合这两种模式各自的优势,又发展出了滑动聚束模式。滑动聚束模式是一种比较新颖的 SAR 成像模式^[3],它通过控制天线辐照区在地面的移动速度来控制方位分辨率,其成像的面积比聚束 SAR 大,分辨率高于相同天线尺寸条带 SAR 的分辨率,可在分辨率和成像面积间进行权衡。因此,滑动聚束成像模式在机载和星载 SAR 都有着广泛的应用^[4-5]。

高分辨率滑动聚束成像增加了合成孔径的时间,因此会产生较大的数据量。与条带 SAR 相比,其方位多普勒带宽更宽,在斜视情况下还会出现方位多普勒中心非零和方位附加带宽等问题。由于滑动聚束模式下脉冲重复频率(Pulse repetition frequency, PRF)往往比方位向带宽小,因此还会存在方位频谱混叠问题^[6-9]。针对该问题,滑动聚束 SAR 成像可采用方位重采样技术^[10]、两步法^[11-13]和子孔径法^[14-15]。其中方位重采样技术通过重采样从方位混叠的频谱中重构出非混叠的频谱。两步法则先通过 Deramping 预处理消除方位频域混叠,然后采用条带成像算法聚焦。但是当原始数据量较大时,这两种处理方法对设备内存要求很高。子孔径法是将整个合成孔径分为 $N(N \geq 2)$ 个子孔径,对每个子孔径数据独立处理,最后通过数据拼接对全孔径数据进行处理获得全分辨率图像。子孔径处理对内存要求较低,具有很大的灵活性。已有的子孔径处理研究中,大部分都注重子孔径成像方法的研究,而在子孔径如何划分方面并没有完整的理论研究。文献[14~17]分析了滑动聚束 SAR 方位多普勒历程,在此基础上提出了如何确定子孔径长度,但子孔径重叠率以及不同斜视角情况下如何划分子孔径并未做出过多讨论。对子孔径处理方法而言,对斜视、尤其是大斜视情况下的子孔径划分,不仅决定能否解决方位频谱混叠问题,还严重影响成像质量和效率。本文首先阐述了斜视下方位频域 Scaling 子孔径滑动聚束 SAR 成像算法,随后就该算法中如何进行子孔径划分做出详细的理论分析和推导。根据相邻子孔径的二维频谱,研究了子孔径频谱拼接的准则,推导了确定子孔径长度与重叠率的解析式,给出子孔径划分的理论依据。最后通过点目标仿真及实测数据的处理对算法理论加以验证。

1 滑动聚束 SAR 分析

滑动聚束 SAR 斜平面几何模型如图 1 所示。滑动聚束 SAR 几何模型如图 1 所示。 O 和 O' 分别为孔径中心和场景中心点, O_{rot} 为旋转中心点, θ_s 为斜视角, R_0 和 R_{rot} 分别为孔径到场景最短距离和孔径到旋转中心最短距离。载体速度为 V_a , 在孔径路径起始点 A 处,波束中心指向场景边缘点 A' , 此时波束中心斜视角为 θ_a , 载体沿着孔径 AB 飞行,雷达波束中心在地面以匀速 V_g 扫描,到孔径路径终止点 B 处,波束中心指向场景另一边缘点 B' , 此时波束中心斜视角为 θ_b 。根据多普勒历程计算公式,方位向频率与发射信号波长和斜视角的变化都有关,而信号波长的变化与距离向的频率有关^[1-18]。结合距离向频率和斜视角的取值范围,可以得到最大和最小的方位向频率^[19]为

$$f_{a_max} = \frac{2V_a(f_c + B_r/2)}{c} \sin\left(\theta_a + \frac{\theta_{bw}}{2}\right) \quad (1)$$

$$f_{a_min} = \frac{2V_a(f_c - B_r/2)}{c} \sin\left(\theta_b - \frac{\theta_{bw}}{2}\right)$$

式中: θ_{bw} 为雷达 3 dB 波束宽度, f_c 为发射信号载频, B_r 为

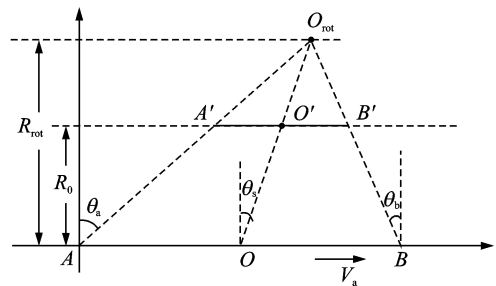


图 1 滑动聚束 SAR 几何模型

Fig. 1 Sliding spotlight SAR geometry model

发射信号带宽,则斜视滑动聚束 SAR 的方位向带宽就等于方位频率最大值和最小值之差,即有

$$B_a = f_{a_max} - f_{a_min} = \frac{2V_a f_c}{c} (\sin\theta_a - \sin\theta_b) \cos \frac{\theta_{bw}}{2} + \frac{2V_a f_c}{c} \left(\frac{\cos\theta_a + \cos\theta_b}{2} \right) \sin \frac{\theta_{bw}}{2} + \frac{V_a B_r}{c} (\sin\theta_{s_max} + \sin\theta_{s_min}) = B_{rot} + B_{wa} + B_{ap} \quad (2)$$

图 2 给出了正侧视和斜视两种情况下,滑动聚束 SAR 方位多普勒历程,其中 T_a 为合成孔径时间。如图 2 中正侧视和斜视两种情况下都含有 B_{rot} 和 B_{ax} 两项。但在斜视情况下,方位瞬时带宽由 B_{wa} 和 B_{ap} 两项组成,比正侧视情况多出 B_{ap} 项,该项为距离方位耦合附加带宽,由距离方位耦合引起。 B_{ap} 项会引起方位向频谱混叠,对成像造成严重影响^[20-21]。

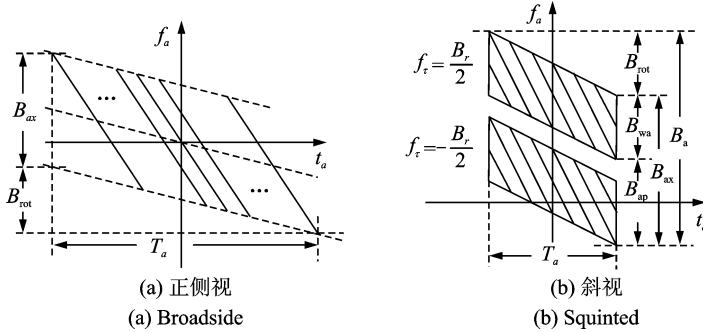


图 2 滑动聚束 SAR 多普勒历程

Fig. 2 Doppler frequency history of squinted sliding spotlight mode SAR

2 斜视下方位频域 Scaling 子孔径滑动聚束 SAR 成像算法

滑动聚束 SAR 方位带宽随斜视角增大而变宽,但是雷达系统的 PRF 通常并不能满足方位奈奎斯特采样,因此方位频谱会出现混叠现象。从式(4)可知,当孔径长度减小时,雷达波束转角减小, θ_a 和 θ_b 的差值减小,方位多普勒带宽也将会减小。因此,可以将全孔径划分为子孔径处理,消除方位频谱混叠,然后再将子孔径拼接实现全孔径高分辨率成像。本节讨论斜视下方位频域 Scaling 子孔径滑动聚束 SAR 成像算法,该方法主要分为子孔径划分、成像与拼接 3 部分。子孔径划分部分主要是将场景中任意点 P 的全孔径雷达回波数据划分为 N 个子孔径,则第 i 个子孔径回波信号可以表示为

$$ss_i(\tau, t_a; R_p) = \sigma_n \text{rect} \left(\tau - \frac{2R(t_a; R_p)}{c} \right) \text{rect} (t_a + iT_{sub}) \cdot \exp \left(-j \frac{4\pi f_c R(t_a; R_p)}{c} \right) \exp \left[j\pi K_r \left(\tau - \frac{2R(t_a; R_p)}{c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: i 取值 $0 \sim N-1$, $R(t_a; R_p)$ 为雷达瞬时位置到点 P 的距离, R_p 为点 P 径向距离, t_a 和 τ 分别为方位向时间和距离向时间, K_r 为发射信号调频斜率, σ_n 为反射系数。子孔径成像部分用斜视 ωk 算法处理,根据文献[22],对第 i 个子孔径回波信号进行斜视 ωk 算法,得到二维频域表达式为

$$SS_i(f_r, f_a; R_p) = \sigma_n \text{rect} \left(\frac{f_r}{\Omega_{f_r}} \right) \text{rect} \left(\frac{f_a - f_{dc,i}}{\Omega_{f_a}} \right) \exp \left(-j2\pi f_a \frac{X_p}{V_a} \right) \cdot \exp \left(j2\pi f_a iT_{sub} \right) \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (R_p - R_{ref}) (f_c + f_r) \right] \quad (4)$$

式中: Ω_{f_r} 和 Ω_{f_a} 分别为距离向和方位向频域, X_p 为点 P 方位向坐标, $R_{ref} = \frac{R_0}{\cos(\theta_s)}$ 为参考距离。式中

第 1 项 $\exp(-j2\pi f_a i \frac{X_p}{V_a})$ 为点 P 方位位置信息,第 2 项 $\exp(-j2\pi f_a iT_{sub})$ 为第 i 个子孔径方位位置信息。正是由于子孔径方位信息的不同,才能实现子孔径方位数据的拼接。子孔径拼接处理是将斜视 ωk 算法聚焦后的子孔径方位向信号线性调频后得到方位数据,然后根据子孔径划分时的重叠率进行子孔径拼接。子孔径信号经过斜视 ωk 算法处理变换到子孔径距离多普勒域,乘以方位频域 Scaling 因子,恢复方位线性调频为

$$H_{scaling} = \exp(j2\pi t_v f_a + j \frac{\pi f_a^2}{K_{scl}(r)}) \tag{5}$$

式中: r 为距离轴,根据文献[14,15], $t_v = \frac{\lambda r f_{dc,i} \cos(\theta_s)}{2V_a^2 \sqrt{1 - (\frac{\lambda f_{dc,i}}{2V_a})^2}}$ 可以消除方位时间位移, $f_{dc,i}$ 为第 i 个子孔径多普勒中心频率, $-\frac{PRF}{2} \leq f_a \leq \frac{PRF}{2}$, $K_{scl}(r) = \frac{2V_a^2 \cos^2(\theta_s)}{\lambda r}$ 随距离单元变化。经过方位频域 Scaling 后,进行方位逆傅里叶变换得到方位数据域,然后根据子孔径划分时的重叠率进行子孔径拼接得到方位全孔径数据。进行全孔径方位去旋转,消除方位波束围绕旋转中心产生的调频,则

$$H_{de-rotation} = \exp(j\pi K_{rot} t_{a,all}^2 - j2\pi f_{dc,all} t_{a,all}) \tag{6}$$

式中: $t_{a,all}$ 和 $f_{a,all}$ 分别为全孔径方位时间和方位频率, $j2\pi f_{dc,all} t_{a,all}$ 为消除多普勒频率偏移。对方位傅里叶变换进行方位脉压,此时有效的方位多普勒斜率为 $K_{eff}(r) = K_{rot} - K_{scl}(r)$, 脉压因子为

$$H_{compress} = \exp(j \frac{\pi f_{a,all}^2}{K_{eff}(r)}) \tag{7}$$

脉压后进行方位向逆傅里叶变换得到最终的 SAR 图像。斜视下方位频域 Scaling 子孔径滑动聚束 SAR 成像算法处理流程如图 3 所示。

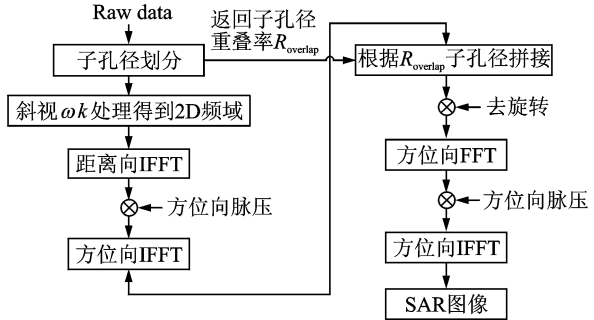


图 3 算法处理流程

Fig. 3 Processing flowing of algorithm

3 子孔径划分原理

3.1 基本原理

方位频域 Scaling 滑动聚束 SAR 成像算法第 1 步是进行子孔径的划分,因此子孔径的长度和重叠率势必影响成像质量和成像效率。根据图 2(b)所示,若子孔径长度为 T_{sub} ,则子孔径方位带宽 $B_{a,sub}$ 应为

$$B_{a,sub} = B_{rot} + B_{ax}(\theta_{sr}) \tag{8}$$

式中: B_{rot} 为方位向波束旋转带宽,可以表示为

$$B_{rot} = |K_{rot}| T_{sub} \tag{9}$$

式中: K_{rot} 为旋转中心产生的多普勒斜率,根据文献[20], $K_{rot} = \frac{2V_a^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_{rot}}$ 。为了避免子孔径方位频域混叠,则必须满足

$$B_{a,sub} \leq PRF \tag{10}$$

相应的子孔径长度应满足

$$T_{sub} \leq \frac{PRF - \max[B_{ax}(\theta_{sr})]}{|K_{rot}|} \tag{11}$$

在相邻的两个子孔径之间,由于斜视角不同,导致其二维频谱方位扭曲程度不同。如果子孔径划分

时没有重叠,在子孔径拼接时,二维频谱之间势必留下“空隙”,造成部分频谱丢失和整体频谱的不连续,导致目标部分信息丢失,影响成像效果。因此子孔径的重叠率要满足子孔径频谱拼接无“空隙”的准则。子孔径拼接的二维频谱示意图如图4所示。图4中虚线为两相邻子孔径多普勒中心频率,在 $f_r = \frac{B_r}{2}$ 处两相邻子孔径多普勒中心之差为

$$\Delta B_d = \frac{2V_a |\sin\theta_{s,i} - \sin\theta_{s,i-1}| (f_c + B_r/2)}{c} \quad (12)$$

式中: $\theta_{s,i}$ 和 $\theta_{s,i-1}$ 分别为第 i 和第 $i-1$ 个子孔径中心斜视角。对于两相邻等长度子孔径,根据方位带宽计算式,由于其斜视角相差并不大,因此可认为两相邻子孔径方位带宽相等。根据多普勒公式,在二维频域中, $f_r = f_c + B_r/2$ 处有第 $i-1$ 个子孔径的方位带宽

$$B_{a_sub,i-1} = \frac{2V_a |\sin\theta_{a,i-1} - \sin\theta_{b,i-1}| (f_c + B_r/2)}{c} \quad (13)$$

设第 i 和第 $i-1$ 个子孔径中心斜视角之差 $\Delta\theta_i = \theta_{s,i} - \theta_{s,i-1}$, 由于 $\Delta\theta_i$ 很小, $\cos\Delta\theta_i$ 可以近似为 1, $\Delta\theta_i$ 近似为

$$\Delta\theta_i \leq \frac{|\sin\theta_{a,i-1} - \sin\theta_{b,i-1}|}{\cos\theta_{s,i-1}} \quad (14)$$

根据几何关系,第 i 和第 $i-1$ 个子孔径之间长度间隔可以近似为 $\Delta\theta_i \frac{R_{rot}}{\cos\theta_{s,i-1}}$, 则孔径重叠率为

$$R_{overlap,i} \geq \frac{(T_{sub} - \frac{\Delta\theta_i R_{rot}}{V_a \cos\theta_{s,i-1}})}{T_{sub}} \quad (15)$$

3.2 划分原理分析

当子孔径等长度划分满足式(14)时,滑动聚束 SAR 子孔径法可以消除方位频谱混叠现象。当子孔径重叠率满足式(15),则不会出现拼接时目标频谱信息丢失。为了使用的方便,一般将全孔径等长度划分为多个子孔径。通常情况下,式(14)得出的子孔径长度最大值比较大,子孔径划分一般不会超出该值。但是,从式(15)可以看出,第 i 个子孔径重叠率与 $\theta_{s,i-1}$ 和 $\Delta\theta_i$ 有关。因此,从式(15)算出的各个子孔径重叠率不同,对于子孔径重叠率需要着重分析。图5给出了斜视角 $\theta_s = 30^\circ$ 和 $\theta_s = 40^\circ$ 滑动聚束 SAR 通过式(15)算出的重叠率,采用全孔径长度为 32 768 个脉冲,以 4 096 个脉冲作为子孔径长度进行划分为例。从图5中可以看出,斜视角为 30° 和 40° 时,各个子孔径间的重叠率虽然不同,但相差并不大,并且随着子孔径中心斜视角增大而增大。因此,为了实现等长度、等间隔的划分子孔径,避免所有子孔径拼接时出现二维频谱“空隙”,应采取所有子孔径间重叠率最大值进行划分,式(15)可以改为

$$R_{overlap} \geq \frac{\max_i \left[T_{sub} - \frac{\Delta\theta_i R_{rot}}{V_a \cos\theta_{s,i-1}} \right]}{T_{sub}} \quad (16)$$

根据式(16),算出了各种不同斜视角下,等长度、等间隔划分子孔径重叠率的最小值,如图5所示。从图6可以看出,随着斜视角的增大,重叠率也需要增大,计算量会增加。子孔径的划分规律可总结为:(1)随着斜视角的增加,子孔径重叠率也随之增大,但二者并不保持线性变化关系。(2)由图6可知,在小斜视角下,子孔径重叠率随着斜视角的增加缓慢增大;当斜视角超过 30° 后,重叠率随着斜视角的增加加速增大。(3)在扫描角变化范围较小的情况下,重叠率变化也较小,因此可采取子孔径间重叠率最大

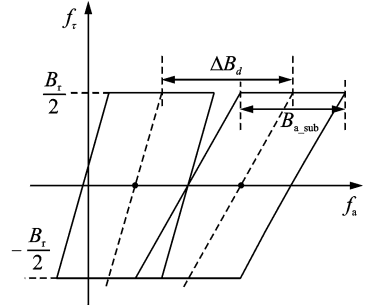


图4 子孔径拼接二维频谱示意图
Fig. 4 Sub-aperture stitching two-dimensional spectrum

值进行划分。(4)在大斜视角且扫描角变化范围较大的情况下,子孔径重叠率较大,因此尽量选用子孔径间的随子孔径变化的重叠率,提高成像效率。

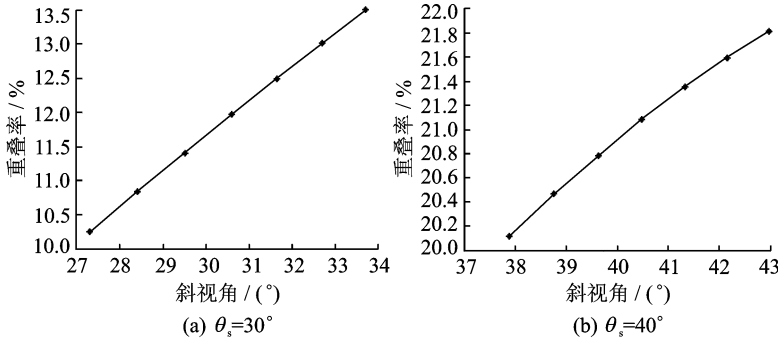


图 5 子孔径重叠率随子孔径中心斜视角的变化

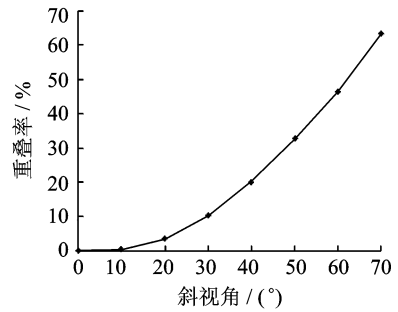


图 6 不同斜视角子孔径重叠率

Fig. 5 Sub-aperture overlap rate changing with the sub-aperture center squinted angle

Fig. 6 Sub-aperture overlap rate of different squinted angles

对于等长度、等间隔子孔径划分,主要步骤为:(1)根据式(14)确定子孔径长度最大值。(2)选择合适的子孔径长度。(3)计算各个子孔径重叠率,得到子孔径重叠率最小值。(4)选择合适的子孔径重叠率,应留有一定余量,但也不需要采用过大的重叠率,否则会加大计算量。(5)根据选取的子孔径长度和重叠率进行子孔径划分。图 7 给出了子孔径划分流程图。

4 实验分析

为验证滑动聚束 SAR 成像子孔径划分方法,由于单个点目标的二维频谱更容易清晰地观测频谱信息,因此采用了单个点目标仿真,另外利用实测数据成像进一步验证了该方法的有效性。点目标仿真 SAR 系统参数如表 1 所示。本实验对斜视角 $\theta_s = 30^\circ$ 、 $\theta_s = 40^\circ$ 的滑动聚束 SAR 进行不同子孔径重叠率的点目标仿真,采用全孔径 25 000 个脉冲,分等长度 2 个子孔径处理。表 2 算出两种不同斜视角下的方位带宽,可以看出方位向总带宽大于 PRF 会出现频谱混叠,因此,根据以上分析划分子孔径,减小方位带宽避免方位频

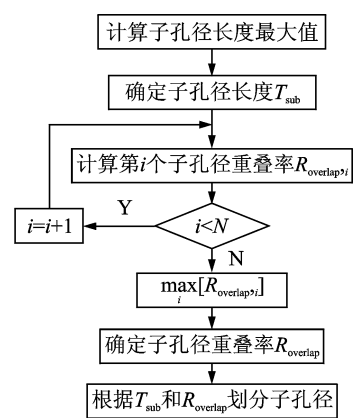


图 7 子孔径划分流程图

Fig. 7 Sub-aperture partitioning flowing

表 1 仿真实验 SAR 系统参数

Tab. 1 SAR parameters in simulation experiment

参数	参数值
载频/GHz	10
脉冲宽度/ μ s	20
发射信号带宽/MHz	300
载机速度/($m \cdot s^{-1}$)	150
孔径到场景最短距离/km	10
旋转半径/km	20
PRF/Hz	1000
斜视角/ $^\circ$	30,40

表 2 不同斜视角下全孔径方位带宽

Tab. 2 Full aperture azimuth bandwidth for different squinted angles

参数	斜视角 30°	斜视角 40°
方位总带宽 B_a /Hz	1 497	1 152
波束旋转带宽 B_{rot} /Hz	1 219	845
波束带宽 B_{wa} /Hz	130	115
距离方位耦合附加带宽 B_{ap} /Hz	148	192

谱混叠。图 8 和图 9 分别为不同斜视角、不同重叠率下子孔径拼接后的二维频谱和点目标，表 3 和表 4 给出了对应情况下点目标方位向参数。从图 8 可以看出，当子孔径重叠率不满足式(16)时，子孔径拼接后的二维频谱出现“空隙”，随着重叠率的增加，拼接后的二维频谱缺失减少，当子孔径重叠率满足式(16)时，拼接后的二维频谱变得完整。从图 9 以及表 3, 4 中可以看出，随着子孔径重叠率的增加，点目标聚焦效果变好；当子孔径重叠率满足式(16)时，子孔径拼接后二维频谱变得完整，点目标完全聚焦。

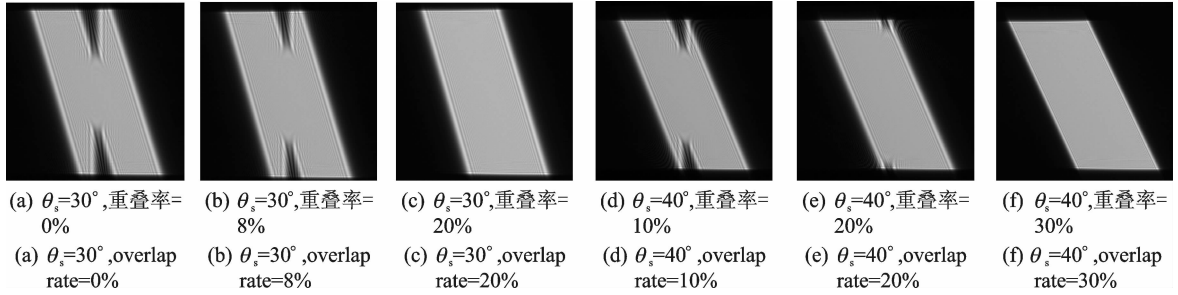


图 8 子孔径拼接后二维频谱

Fig. 8 Two-dimensional spectrum after sub-aperture stitching

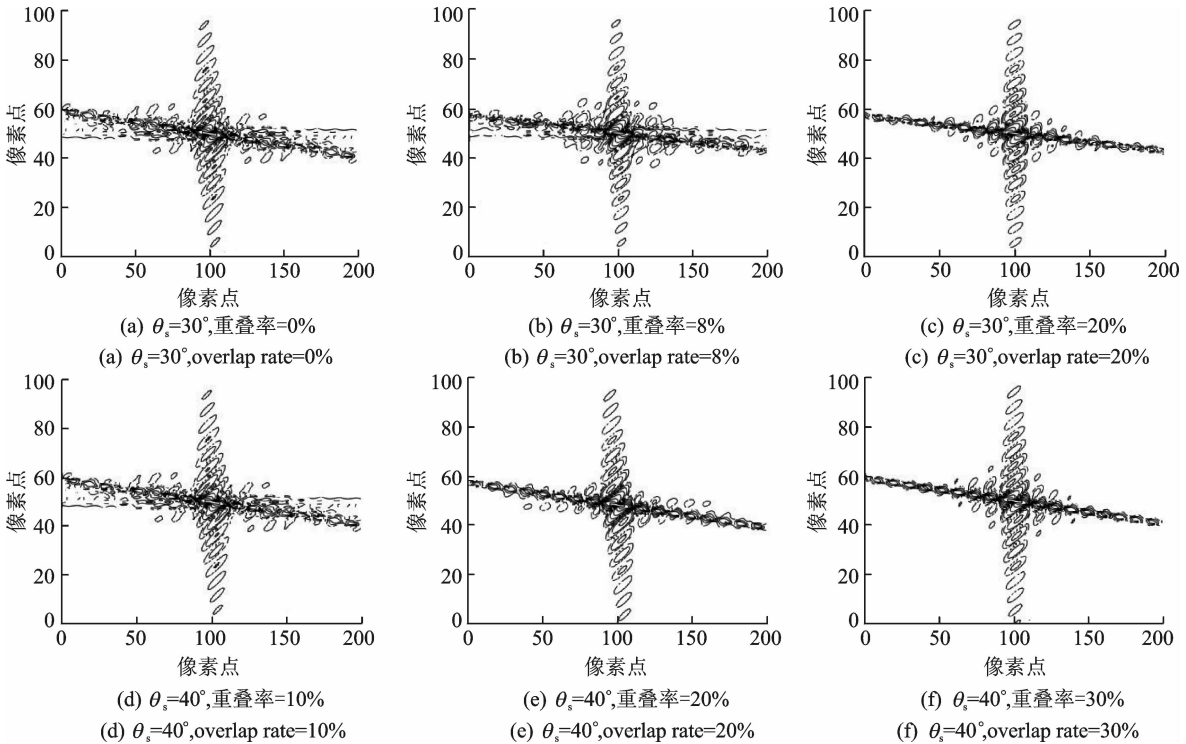


图 9 点目标扩展函数

Fig. 9 Point target spread function

表 3 斜视角 30° 点目标方位向参数

Tab. 3 Point target azimuth parameters for 30° squinted

项目	重叠率 0%	重叠率 8%	重叠率 20%
PSLR	-12.7	-13.2	-13.3
ISLR	-8.2	-9.0	-9.8

表 4 斜视角 40° 点目标方位向参数

Tab. 4 Point target azimuth parameters for 40° squinted

项目	重叠率 10%	重叠率 20%	重叠率 30%
PSLR	-12.8	-13.0	-13.2
ISLR	-9.7	-10.3	-10.5

受实测数据斜视角度的限制,实测数据验证仅采用斜视角为 18° ,孔径长度为 65 536 个脉冲的某机载雷达实测数据。根据子孔径划分原理等长度、等间隔划分子孔径,采用子孔径长度为 4 096 个脉冲,分别选用 3%,6%和 12.5% 3 种不同子孔径重叠率在同等聚焦处理情况下进行子孔径成像处理,得到 SAR 图像局部图如图 10 所示。

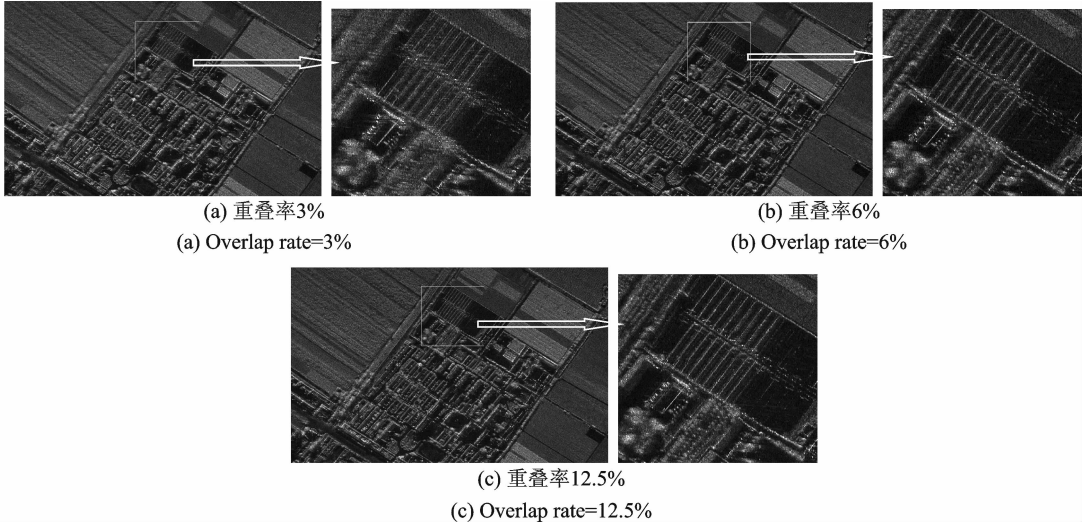


图 10 SAR 图像

Fig. 10 SAR image

根据子孔径重叠率的计算和图 6 可知,斜视角为 18° 时,子孔径重叠率不应低于 5% 左右。从图 10 的 3 种情况可以看出,当重叠率为 3% (低于 5% 时),SAR 图像质量最低,当重叠率为 12.5% (高于 5% 时),SAR 图像质量最好,当重叠率为 6% 时,正好位于理论计算值 5% 左右,SAR 图像质量介于重叠率为 3% 和 12.5% 之间。因此进一步证明,当子孔径重叠率不满足子孔径划分原理时,将影响最终的 SAR 图像质量。

5 结束语

针对斜视滑动聚束 SAR 中方位向频谱混叠现象,本文提出了斜视下方位频域 Scaling 子孔径滑动聚束 SAR 成像算法,并就该算法中子孔径划分,分析了不同斜视角下如何确定子孔径长度和重叠率,提出了相应的子孔径划分理论。仿真实验和实测数据处理结果证明子孔径划分理论和斜视下成像的正确性和实用性,达到了预期效果。通过子孔径划分原理得出的子孔径长度和子孔径重叠率能给予子孔径划分提供很好的参考。

参考文献:

- [1] Ian G C, Frank H W. 合成孔径雷达成像算法与实现[M]. 北京:电子工业出版社,2012: 169-226.
Ian G C, Frank H W. Digital processing of synthetic aperture radar data: Algorithm and implementation [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2012:169-226.
- [2] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2010: 6-11.
Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar imaging technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010:6-11.
- [3] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, et al. Efficient simulation of hybrid stripmap/spotlight SAR raw signals from extended scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004,42(11):2385-2396.
- [4] Mittermayer J, Lord R, Borner E. Sliding spotlight SAR processing for terraSAR-X using a new formulation of extend chirp scaling algorithm[C]//Proceeding of IGARSS. Toulouse, France;IGARSS,2003:1462-1464.
- [5] 刘寒艳,宋红军,程增菊. 条带模式、聚束模式和滑动聚束模式的比较[J]. 中国科学院研究院学报,2011,28(3):410-416.

- Liu Hanyan, Song Hongjun, Cheng Zengjü. Comparative study on stripmap mode, spotlight mode, and sliding spotlight mode[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2011, 28(3): 410-416.
- [6] 韩冰, 张永军, 胡东辉, 等. 星载滑动聚束 SAR 成像模型误差校正方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(7): 1694-1699.
Han Bing, Zhang Yongjun, Hu Donghui, et al. Research on mending of space-borne sliding spotlight SAR imaging mode error[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(7): 1694-1699.
- [7] Zamparelli V, Fornaro G, Lanari R, et al. Processing of sliding spotlight SAR data in presence of squint[C]//Proceedings of IGARSS. Munich, Germany: IGARSS, 2012: 213-2140.
- [8] Guo D, Xu H, Li J. Extended wavenumber domain algorithm for highly squinted sliding spotlight SAR data processing[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2011, 114: 17-32.
- [9] Sun G C, Xing M D, Wang Y, et al. Sliding spotlight and TOPS SAR data processing without subaperture[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1036-1042.
- [10] Belcher D P, Baker C J. High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR[J]. *IEE Proceedings Radar Sonar and Navigation*, 1996, 143(6): 366-374.
- [11] Lanari R, Zoffoli S, Fornaro G, et al. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing[J]. *IEEE Pro. Radar, Sonar Navig*, 2001, 148(6): 363-372.
- [12] Gao C G, Wang R, Deng Y K, et al. Large-scene sliding spotlight SAR using multiple channel in azimuth[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2013, 51(5): 1006-1010.
- [13] Xu W, Deng Y, Wang R. Full-aperture SAR data focusing in the spaceborne squinted sliding-spotlight mode[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4596-4607.
- [14] Mittermayer J, Moreira A, Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [15] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2010, 48(2): 770-780.
- [16] 马兵强. 滑动聚束 FMCW-SAR 的子孔径波数域成像算法[J]. *雷达学报*, 2013, 2(3): 319-325.
Ma Bingqiang. Sub-aperture wavenumber domain imaging algorithm for sliding spotlight FMCW-SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 319-325.
- [17] 王国栋, 周荫清, 李春升. 星载聚束式 SAR 子孔径成像处理方法[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(1): 9-16.
Wang Guodong, Zhou Yingqing, Li Chunsheng. A sub-aperture image approach of spaceborne spotlight SAR[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2003, 25(1): 9-16.
- [18] Davidson G, Cumming I. Signal properties of spaceborne squint-mode SAR[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 611-617.
- [19] Cafforio C, Prati C, Rocca F. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 1991, 27(2): 194-207.
- [20] 韩晓磊, 李世强, 王宇, 等. 斜视滑动聚束模式 SAR 成像算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(12): 2843-2849.
Han Xiaolei, Li Shiqiang, Wang Yu, et al. Study on squint sliding spotlight mode SAR imaging[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2843-2849.
- [21] Mo Y J, Yan H, Zhao B J. Novel approach based on de-ramping technique for squinted sliding spotlight SAR imaging[J]. *Journal of Electronics*, 2013, 30(3): 243-253.
- [22] An D X, Huang X T, Zhou Z M. Extend wave number domain algorithm for airborne low frequency SAR in highly squinted mode[C]//IET International Radar Conference. Guilin: IET, 2009: 1-4.

作者简介:



张劲东 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 雷达信号分析与处理、高速数字信号处理系统设计与实现与 DSP 和 FPGA 开发与应用, E-mail: zjds@126.com.



陈家瑞 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 雷达信号处理, E-mail: chenjr_nuaa@163.com.



朱岱寅 (1974-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向: 雷达成像和信号处理, E-mail: zhudy@nuaa.edu.cn.

邱晓燕 (1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 雷达成像和信号处理。

唐笑为 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 雷达信号处理。

