

文章编号:2095-6134(2021)04-0511-08

基于双曲等效的双星滑动聚束 SAR 两步成像算法^{*}

向建冰^{1,2}, 吕孝雷^{1†}, 付希凯¹

(1 中国科学院空天信息创新研究院 中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室, 北京 100094;
2 中国科学院大学电气与电子通信工程学院, 北京 100049)
(2019 年 11 月 21 日收稿; 2020 年 1 月 14 日收修稿稿)

Xiang J B, Lü X L, Fu X K. Two-step imaging algorithm of bistatic sliding-spotlight SAR based on hyperbolic equivalent method[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(4): 511-518.

摘 要 双星滑动聚束模式合成孔径雷达(SAR)既保持了双星 SAR 的灵活性、可靠性和稳定性, 同时还可产生高分辨率的图像对, 对于观测和测绘具有巨大的潜力。这种模式下需要兼顾双星成像与多普勒带宽显著增加的问题。分析双星滑动聚束 SAR 系统下目标的多普勒特性, 结合双星成像算法与频谱分析法, 提出一种基于双曲等效的双星滑动聚束 SAR 2 步成像算法。同时, 针对双曲等效模型误差导致算法聚焦质量下降的问题, 提出模型误差补偿方法, 给出完整算法处理流程, 最后用仿真实验验证所提出的算法。

关键词 星载双星 SAR; 滑动聚束模式; 谱分析; 误差补偿

中图分类号: TN957. 52 文献标志码: A doi: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2021. 04. 010

Two-step imaging algorithm of bistatic sliding-spotlight SAR based on hyperbolic equivalent method

XIANG Jianbing^{1,2}, LÜ Xiaolei¹, FU Xikai¹

(1 Key Laboratory of Technology in Geo-Spatial Information Processing and Application Systems of CAS, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2 School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Bistatic sliding-spotlight synthetic aperture radar (SAR) can not only maintains the flexibility, reliability and stability of the bistatic SAR, but also produce high-resolution image pairs with great potential for observation and mapping. This mode should consider both characteristics of bistatic imaging and a significant increase in Doppler bandwidth. In this paper, the Doppler characteristics of the target in bistatic sliding-spotlight SAR system are analyzed, then, a two-step imaging algorithm based on hyperbolic equivalent method is proposed by combining the bistatic imaging algorithm with the spectrum analysis method. At the same time, for the degradation of the focus quality caused by the error of hyperbolic equivalent model, the model error compensation method is proposed, and the complete algorithm processing flow is given. Finally, the proposed algorithm is verified by simulation experiments.

^{*} 国家自然科学基金(41801356)和陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY08-05)资助

[†] 通信作者, E-mail: academism2017@ sina. com

Keywords spaceborne bistatic SAR; sliding-spotlight mode; spectral analysis (SPECAN); error compensation

双星合成孔径雷达系统 (synthetic aperture radar, SAR) 是利用收发雷达平台分置实现干涉测量的一种技术。与传统的单星 SAR 系统相比, 由于其构型灵活, 在干涉测量、层析成像、高分辨率宽幅成像等方面具有独特的优势。通过调整卫星间的基线, 可以提高信号相关性和测高灵敏度, 获取全球高精度数字高程图。

近年来, 越来越多的新成像模式应用在 SAR 中, 其中滑动聚束是介于经典条带模式和聚束模式之间的一种工作模式, 它通过转动天线指向实现对目标场景面以下虚拟转动点的凝视, 可以在方位向同时获得较高的空间分辨率和一次成像宽度。双星滑动聚束 SAR 系统兼具 SAR 系统灵活可靠和滑动聚束模式高分辨率的优点, 在高分辨率干涉测量方面具有巨大优势。

双星 SAR 系统一般采用一发双收的工作模式, 利用双星 SAR 系统进行干涉测量需要研究双基 SAR 成像算法。在双星 SAR 中, 由于双程斜距的双根号形式, 难以直接应用驻定相位原理求解点目标的二维频谱。文献[1]提出适用于任何构型双基 SAR 的时域成像方法, 这种方法可以产生最佳的图像质量但同时也带来巨大的计算复杂性。文献[2]将平行构型的双基 SAR 等效成单基 SAR, 从而可以运用传统的单基 SAR 成像方法处理双基数据。文献[3]运用 Loffeld bistatic formula (LBF) 方法对收发相位历程在各自驻相点处二阶泰勒展开, 得到任意构形下双基 SAR 点目标的二维近似频谱。文献[4]则采用级数反演法求解任意构形双基地 SAR 点目标的二维频谱, 但这些算法均未考虑滑动聚束模式下的成像。

滑动聚束模式通过波束扫描, 在实现高分辨率和方位向大场景成像的同时, 也导致了方位向信号频谱展宽, 如果采用较小的脉冲重复频率 (pulse repetition frequency, PRF), 会使得全孔径在方位向上产生混叠, 如果设计较大的 PRF, 数据量会急剧增加, 导致处理时间变长, 同时会限制距离向幅宽, 造成距离向模糊。目前, 处理滑动聚束模式数据的方法主要可分为子孔径处理方法和全孔径方法。文献[5]和[6]分别提出扩展 CS (extended chirp scaling, ECS) 方法和方位基带变标方法处理子孔径数据, 这种算法所需的 PRF 较

大, 不利于实时处理, 而且子孔径方法需要进行复杂的子图像拼接。文献[7]提出 2 步算法, 先通过谱分析 (spectrum analysis, SPECAN) 进行方位滤波去除方位向混叠, 再用传统条带算法处理。文献[8]在 2 步算法的基础上结合 ECS 算法提出适用于斜视情况的 ECS 处理算法。但是这些算法都是基于单基 SAR 的成像几何推导而来, 不适用于双基 SAR。

本文首先讨论双星滑动聚束 SAR 系统的成像几何模型和信号模型, 分析不同方位目标的多普勒特性, 然后采用 SPECAN 技术去除方位向混叠, 结合方位向滤波和双星双曲等效成像算法, 提出一种基于双曲等效的双星滑动聚束 SAR 2 步成像算法。针对算法中双曲等效斜距模型精度不足和模型参数沿方位向时变显著的问题, 提出模型误差补偿方法并加入算法中, 最后用仿真实验验证算法的有效性。

1 双星滑动聚束 SAR 成像几何模型与信号模型

本文讨论的平行构型下双星滑动聚束 SAR 系统的成像几何关系如图 1 所示, 主星为发射平台, 辅星为接收平台, T 为一次成像时间, 设方位中心时刻为 $\eta = 0$ 时刻, P_{rotM} 和 P_{rotS} 分别表示主辅星的虚拟转动点, Δx 为主辅星间基线在飞行方向的分量, x 为被照射目标所处的方位坐标, 取场景中心处 $x = 0$, X 为波束在地面瞬时照射范围, X_f 为滑动聚束全分辨率成像的方位向范围。为实现干涉测量, 两卫星雷达天线波束必须同时覆盖同一地区, 实现波束同步。对于星载 SAR 而言, 为了沿用传统成像理论和方法, 提出星载 SAR 等效距离模型, 即利用等效的匀速直线运动产生的斜距历程去逼近天线相位中心到目标的真实斜距历程。

方位中心时刻波束中心照射点 P_c , 即点 P_c 位于 $x = 0$ 处, 目标点 P_x 位于方位向 x 处, 根据图 1 和星载 SAR 等效距离模型, 在方位向时刻 η , P_x 与主辅星的距离关系可以分别表示为

$$R_T(\eta, t, x) = \sqrt{R_{T,c}^2 + (v_{T,c}\eta - x)^2 - 2R_{T,c}(v_{T,c}\eta - x)\cos\varphi_{T,c}} \quad (1)$$

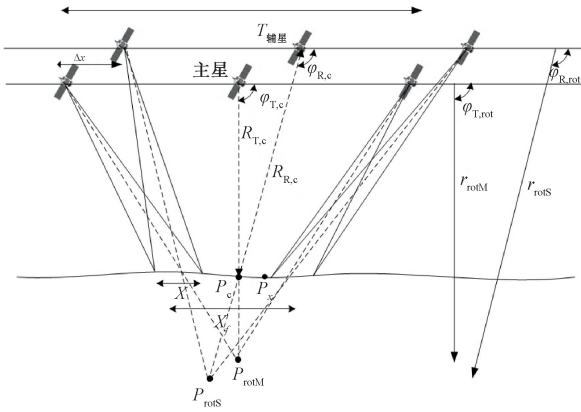


图1 双星滑动聚束 SAR 成像几何

Fig. 1 The geometry model of bistatic sliding-spotlight SAR imaging

$$R_R(\eta, t, x) =$$

$$\sqrt{R_{R,c}^2 + (v_{R,c}\eta + \Delta x - x)^2 - 2R_{R,c}(v_{R,c}\eta - x)\cos\varphi_{R,c}}. \quad (2)$$

其中: $R_{T,c}, R_{R,c}$ 分别为方位向中心时刻主辅星到目标 P_c 的斜距; $\varphi_{T,c}, \varphi_{R,c}$ 分别为主辅星的等效斜视角; $v_{T,c}, v_{R,c}$ 分别为主辅星的等效速度。由此进一步给出点目标的回波模型

$$s(\eta, t, x) = \sigma w_r(t) w_a\left(\frac{A_1 v_{T,c} \eta - x}{X_T}\right) \cdot w_a\left(\frac{A_2 v_{R,c} \eta + \Delta x - x}{X_R}\right) w_a\left(\frac{\eta}{T}\right) w_a\left(\frac{x}{X_f}\right) \cdot \exp\left(-j\pi b\left[t - \frac{2R(\eta, t, x)}{c}\right]^2\right) \exp\left(-j\frac{4\pi R(\eta, t, x)}{\lambda}\right). \quad (3)$$

其中: $R(\eta, t, x) = [R_T(\eta, t, x) + R_R(\eta, t, x)]/2$, σ 为点目标后向散射系数, t 为雷达发射脉冲快时间, b 为发射信号的调频率, λ 为雷达中心频率对应的波长, c 为光速, w_a 为方位向天线图函数, w_r 为发射脉冲包络; $A_1 = (r_{rotM} - R_{T,c})/r_{rotM}$ 为主星的滑动聚束分辨率改善因子, $A_2 = (r_{rotS} - R_{R,c})/r_{rotS}$ 为辅星的滑动聚束分辨率改善因子, 其中 r_{rotM}, r_{rotS} 分别表示方位中心时刻主辅星到各自虚拟转动点的距离。对 $R(\eta, t, x)$ 在 $\eta = x/(A_1 \cdot v_{T,c})$ 处作泰勒展开, 忽略3次项及以上为

$$R(\eta, t, x) = \frac{r_{x,T} + r_{x,R}}{2} + \frac{\lambda}{2} f_{dex} \left(\eta - \frac{x}{A_1 \cdot v_{T,c}}\right) + \frac{\lambda}{4} f_{rx} \left(\eta - \frac{x}{A_1 \cdot v_{T,c}}\right)^2. \quad (4)$$

其中

$$r_{x,T} = \sqrt{R_{T,c}^2 + \left(\frac{1}{A_1} - 1\right)^2 x^2 + 2\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) x R_{T,c} \cos\varphi_{T,c}}, \quad (5)$$

$$r_{x,R} = \sqrt{R_{R,c}^2 + \left(\frac{1}{A_1} + \frac{\Delta x}{x} - 1\right)^2 x^2 + 2\left(\frac{1}{A_1} - 1\right) x R_{R,c} \cos\varphi_{R,c}}, \quad (6)$$

$$f_{dex} = \frac{2}{\lambda} \left[\frac{\left(\frac{1}{A_1} - 1\right)x - R_{T,c} \cos\varphi_{T,c}}{r_{x,T}} v_T + \frac{\left(\frac{1}{A_1} + \frac{\Delta x}{x} - 1\right)x - R_{R,c} \cos\varphi_{R,c}}{r_{x,R}} v_R \right], \quad (7)$$

$$f_{rx} = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{v_{T,c}^2 R_{T,c}^2 \sin^2\varphi_{T,c}}{r_{x,T}^3} + \frac{v_{R,c}^2 R_{R,c}^2 \sin^2\varphi_{R,c}}{r_{x,R}^3} \right). \quad (8)$$

式(7)和式(8)分别为多普勒中心频率和多普勒调频率。平行构型下 $V_{T,c} = V_{R,c}$, 分辨率调节因子满足 $\frac{X}{v_{T,c}T} = \frac{X}{v_{R,c}T} \leq A_1, A_2 \leq A_L < 1^{[7,9]}$, 因此滑动聚束模式下双星 SAR 系统信号的多普勒参数同时是目标方位位置以及分辨率改善因子的函数, 即多普勒参数在方位向具有空变性。

2 方位向去混叠方法

在双星滑动聚束 SAR 系统中, 由于天线指向旋转扫描, 整个场景方位向多普勒带宽远大于 PRF, 直接用传统的双星成像算法^[14]处理会产生方位向混叠的现象。图2为场景中心点目标 P_c 的时频关系图。从图中可以看出滑动聚束模式 SAR 回波的全场景多普勒带宽 B_a 由2部分组成: 一部分是天线照射瞬时多普勒带宽 B_{inst} ; 另一部分为合成孔径时间 T_a 照射产生的带宽 B_T , 可以通过下式计算

$$B_{inst} \approx \frac{v_{T,c} \sin\varphi_{T,c}}{D_T} + \frac{v_{R,c} \sin\varphi_{R,c}}{D_R}. \quad (9)$$

$$B_a = B_{inst} + B_T \approx B_{inst} + \left(\frac{v_{T,c}^2 \sin^2\varphi_{T,c}}{\lambda R_{T,c}} + \frac{v_{R,c}^2 \sin^2\varphi_{R,c}}{\lambda R_{R,c}} \right) T_a. \quad (10)$$

$$B_p \approx \frac{v_{T,c} \sin\varphi_{T,c}}{A_1 D_T} + \frac{v_{R,c} \sin\varphi_{R,c}}{A_2 D_R}. \quad (11)$$

其中: D_T, D_R 分别为主星发射天线和辅星接收天

线的孔径; B_p 表示单点目标的多普勒带宽, 它与分辨率改善因子有关^[10]。由图 2 可知, 全场景方位向带宽会达到 PRF 好几倍, 当 PRF 大于多普勒瞬时带宽但远小于场景带宽时, 目标的多普勒带宽会超过 PRF, 由此产生混叠。

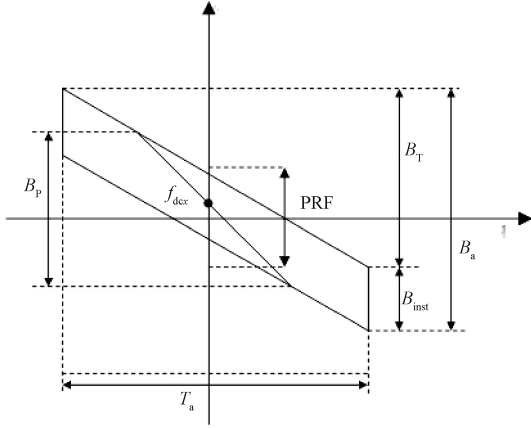


图 2 目标 P_c 时频图

Fig. 2 Time frequency diagram of target P_c

文献[7]提出的 Two-step 算法先通过 SPECAN 操作进行方位向滤波去除方位向混叠, 再用传统单基条带成像算法处理滤波后的数据, 最后通过逆 SPECAN 操作成像。方位向滤波的实质是将回波信号与采样频率高于总带宽的参考信号进行卷积, 参考信号的频率变化特性与成像多普勒中心频率的变化相反, 从而能够提高方位向采样率, 补偿方位向回波中心频

率的变化, 达到减小信号持续时间, 降低数据处理量的目的。

为解决双星滑动聚束 SAR 系统下大场景成像的方位混叠问题, 本文根据 SPECAN 思想^[6-8], 在距离多普勒域进行方位向滤波去除混叠。为了得到双星滑动聚束模式下方位滤波函数的确切表达式, 以目标 P_c 的滤波处理为例进行分析。在星载 SAR 等效距离模型下, 主辅星相对于各自虚拟转动点的斜距可以表示为

$$R_{T, \text{rot}}(\eta) = \sqrt{r_{\text{rotM}}^2 + v_{\text{rotM}}^2 \eta^2 - 2r_{\text{rotM}} v_{\text{rotM}} \eta \cos \varphi_{T, \text{rot}}} \quad (12)$$

$$R_{R, \text{rot}}(\eta) = \sqrt{r_{\text{rotS}}^2 + v_{\text{rotS}}^2 \eta^2 - 2r_{\text{rotS}} v_{\text{rotS}} \eta \cos \varphi_{R, \text{rot}}} \quad (13)$$

其中: $V_{\text{rotM}}, \cos \varphi_{T, \text{rot}}, V_{\text{rotS}}, \cos \varphi_{R, \text{rot}}$ 分别为主辅星相对于各自的虚拟转动点的等效速度和等效斜视角。利用类似文献[11]中的等效方法, 将主辅星相对各自虚拟转动点的斜距历程泰勒展开并等效, 表示如下

$$\begin{aligned} R_{\text{rot}}(\eta) &= \frac{R_{T, \text{rot}}(\eta) + R_{R, \text{rot}}(\eta)}{2} \approx R_{\text{erot}}(\eta) \\ &= \sqrt{r_{\text{rot}}^2 + v_{\text{rot}}^2 \eta^2 - 2r_{\text{rot}} v_{\text{rot}} \eta \cos \varphi_{\text{rot}}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $r_{\text{rot}}, v_{\text{rot}}, \varphi_{\text{rot}}$ 分别为等效后的斜距、速度和斜视角。

$$r_{\text{rot}} = \frac{r_{\text{rotM}} + r_{\text{rotS}}}{2}, \quad (15)$$

$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\left(\frac{v_{\text{rotM}} \cos \varphi_{T, \text{rot}} + v_{\text{rotS}} \cos \varphi_{R, \text{rot}}}{2} \right)^2 + \left(\frac{v_{\text{rotM}}^2 \sin^2 \varphi_{T, \text{rot}} + v_{\text{rotS}}^2 \sin^2 \varphi_{R, \text{rot}}}{r_{\text{rotM}} + r_{\text{rotS}}} \right) r_{\text{rot}} / 2}, \quad (16)$$

将参考函数(19)与回波信号(3)做卷积去除方位向混叠。在离散域中, 卷积可以表示为回波信号与相位函数相乘后求离散傅里叶变换, 然后再与二次相位相乘, 即

$$\begin{aligned} s'(k\Delta\eta') &= \exp(-j2\pi f_{\text{dc, rot}} k\Delta\eta' + j\pi f_{\text{dr, rot}} (k\Delta\eta')^2) \cdot \\ &\text{FFT}\{s(i)\Delta\eta \cdot \exp((j2\pi f_{\text{dc, rot}} i)\Delta\eta + j\pi f_{\text{dr, rot}} (i\Delta\eta)^2)\}. \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $i, \Delta\eta$ 分别为方位滤波前的方位向采样间隔和数量; $k, \Delta\eta'$ 分别为滤波后的方位向采样间隔和数量, 并且满足

$$\begin{aligned} i \cdot \Delta\eta &= T, \\ k &\geq (B_a \cdot \text{PRF} / f_{\text{dr, rot}}), \end{aligned} \quad (23)$$

$$\Delta\eta' = 1 / (f_{\text{dr, rot}} \cdot \Delta\eta \cdot k).$$

在距离多普勒域去除方位向混叠后, 可以采

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{rot}} &= \arccos\left(\frac{v_{\text{rotM}} \cos \varphi_{T, \text{rot}} + v_{\text{rotS}} \cos \varphi_{R, \text{rot}}}{2v_{\text{rot}}}\right). \end{aligned} \quad (17)$$

用等效后的参数生成方位滤波信号, 方位滤波参考信号的形式为

$$h(\eta) = \exp\left(\frac{j4\pi}{\lambda} (R_{\text{rot}}(\eta) - r_{\text{rot}})\right). \quad (18)$$

对式(18)在 $\eta = 0$ 处泰勒展开, 忽略 3 次项及以上有:

$$h(\eta) = \exp(-j2\pi f_{\text{dc, rot}} \eta + j\pi f_{\text{dr, rot}} \eta^2). \quad (19)$$

其中

$$f_{\text{dc, rot}} = -\frac{2v_{\text{rot}} \cos \varphi_{\text{rot}}}{\lambda}. \quad (20)$$

$$f_{\text{dr, rot}} = \frac{2v_{\text{rot}}^2 \sin^2 \varphi_{\text{rot}}}{\lambda r_{\text{rot}}}. \quad (21)$$

用文献[4]中的双曲等效算法将雷达与目标的双根式斜距历程等效成单根式形式,利用等效的单星匀速直线运动去逼近双星斜距历程,等效参数

$$v_m = \sqrt{\left(\frac{v_T \cos \varphi_{T,c} + v_R \cos \varphi_{R,c}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_T^2 \sin^2 \varphi_{T,c}}{R_{T,c}} + \frac{v_R^2 \sin^2 \varphi_{R,c}}{R_{R,c}}\right) R_m / 2},$$
$$\varphi_m = \operatorname{arccos}\left(\frac{v_T \cos \varphi_{T,c} + v_R \cos \varphi_{R,c}}{2 v_m}\right).$$

表 1 主辅星星历仿真参数

Table 1 Ephemeris simulation parameters of master and slave satellite

上述的双曲等效完全等效了双星斜距历程的常数、线性和 2 次项。将计算得到的等效参数作为成像参数代入单星 chirp-scaling 算法推导中,可以得到基于双曲等效的双星 ECS 成像算法,其中 CS 因子、距离补偿因子与单星 ECS 算法类似,但在方位因子上需要加入逆 SPECAN 操作补偿方位向滤波带来的影响,即

$$\phi_3(t, f) = \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda} c t \left(1 - \sin \phi_m \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f}{2 v_m}\right)^2}\right)\right\} \cdot \exp\left\{j \frac{\pi f^2}{f_{\text{dr,rot}}} + j[\Psi_1(f) + \Psi_2(f, r_m)]\right\}.$$

表 2 雷达仿真参数

Table 2 Simulation parameters of radar

式中: $\Psi_1(f)$, $\Psi_2(f, r_m)$ 的定义与文献[12]一致,第 1 个指数项完成方位聚焦,同时为斜距为 R 的目标保留相位 $-4\pi R/\lambda$,第 2 个指数项中的第 1 个相位用来补偿方位滤波处理时参考信号引入的相位,第 2 和第 3 个相位补偿距离徙动校正的残余相位。

3 双曲等效模型误差补偿

之前分析了位于不同方位位置的目标的多普勒特性,在滑动聚束模式下,不同目标方位向中心时刻的多普勒参数是方位位置与分辨率改善因子的函数,即双曲等效模型的多普勒参数沿方位向具有明显的时变性,表现为主辅星与目标的真实距离历程相对于等效后匀速直线运动情况下的距离历程的偏离程度。同时随着一次成像时间的增加和分辨率的提高,偏离程度增大造成的影响不可忽略。在表 1 和表 2 的仿真参数下,多普勒参数偏移会给方位向匹配函数带来约 $2\pi/7$ 的 2 次相位误差,影响方位向聚焦。

在双星 SAR 系统中双曲等效模型多普勒参数时变主要由主辅卫星平台本身非匀速直线运动引入。我们认为相对被照射目标点和虚拟转动点,由非匀速直线运动引起的距离误差是近似相等的,所以可通过计算相对虚拟转动点的非匀速直线运动引起的距离误差间接描述模型参数的时变性。

均在方位中心时刻算得到,等效后的斜距、速度和斜视角分别为:

$$R_m = (R_{T,c} + R_{R,c})/2,$$

表 1 主辅星星历仿真参数

Table 1 Ephemeris simulation parameters of master and slave satellite

星历仿真参数	主星参数	辅星参数
半长轴/km	6 994. 615 87	6 994. 615 87
偏心率/rad	0. 002 9	0. 002 974
升交点赤经/(°)	275. 718	275. 740
轨道倾角/(°)	97. 839	97. 839
近地点幅角/(°)	89. 358	89. 358
真近心角/(°)	180. 388	180. 401

表 2 雷达仿真参数

Table 2 Simulation parameters of radar

成像仿真参数	主星参数	辅星参数
载频/GHz		9. 6
带宽/MHz		600
距离向采样率/MHz		700
脉冲宽度/ μ s		29. 2
脉冲重复频率/Hz		5 707
天线孔径/m		3. 333 5
天线旋转角/(°)	-2. 0~2. 0	-2. 036 4~1. 961 8
波束中心角/(°)	49. 375 2	49. 354 9
分辨率改善因子	0. 138	0. 138

首先将主辅星到各自虚拟转动点距离历程在方位中心时刻展开到 4 阶

$$R_{\text{rotf}}(\eta) = r_{\text{fr}} + f_1 \eta + f_2 \eta^2 + f_3 \eta^3 + f_4 \eta^4.$$

其中: $f = \text{M, S}$, 下标 M 表示主星的参数, 下标 S 表示辅星的参数, r_{fr} 和系数 $f_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 的计算如式(27)所示, 文献[13]中定义了参数 $x_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 。

其中: $f = \text{M, S}$, 下标 M 表示主星的参数, 下标 S 表示辅星的参数, r_{fr} 和系数 $f_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 的计算如式(27)所示,文献[13]中定义了参数 $x_i(i = 1, 2, 3, 4)$ 。

$$\begin{cases} r_{\text{fr}} = R_{\text{rotf}}(0), \\ f_1 = 1/(2r_{\text{fr}}x_1), \\ f_2 = r_{\text{fr}}\left(\frac{1}{2}x_2 - \frac{1}{8}x_1^2\right), \\ f_3 = r_{\text{fr}}\left(\frac{1}{2}x_3 + \frac{1}{16}x_1^3 - \frac{1}{4}x_1x_2\right), \\ f_4 = r_{\text{fr}}\left(-\frac{1}{4}x_1x_3 - \frac{1}{8}x_2^2 + \frac{1}{4}x_4 - \frac{5}{128}x_1^4 + \frac{3}{16}x_1^2x_2\right). \end{cases}$$

利用双曲等效法,主辅星到各自虚拟转动点的斜距和可以用式(14)中的等效距离模型

利用双曲等效法,主辅星到各自虚拟转动点的斜距和可以用式(14)中的等效距离模型

$R_{\text{erot}}(\eta)$ 去逼近, $R_{\text{erot}}(\eta)$ 与 $R_{\text{rotf}}(\eta)$ 之差即为主辅卫星平台本身非匀速直线运动相对虚拟转动点引入的距离误差, 即

$$\Delta R(\eta) = R_{\text{rotM}}(\eta) + R_{\text{rotS}}(\eta) - 2R_{\text{erot}}(\eta). \quad (28)$$

利用在方位频域加入模型误差补偿, 消除模型参数方位时变的影响, 式 (26) 中的实际距离 $R_{\text{rotf}}(\eta)$ 的展开阶数需随着模型时变误差的增加而提高, 补偿函数如下

$$\phi_1 = \exp\left(\frac{j2\pi\Delta R(\eta)(f\lambda + c)}{c\lambda}\right). \quad (29)$$

加入双曲等效模型误差补偿后的整个算法流程图如图 3 所示, 在 ECS 算法之前, 先在距离频域补偿双曲等效模型误差, 再在距离多普勒域进行方位滤波去除方位混叠, 最后在第 3 个 cs 因子上补偿方位滤波的影响。

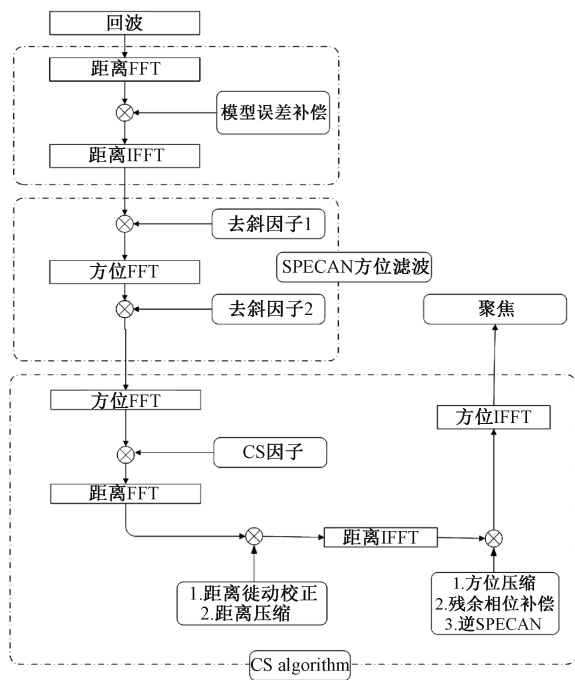


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

4 仿真实验

为了验证所提出的双星滑动聚束 SAR 成像算法, 本文设计如下的双星滑动聚束 SAR 仿真实验, 主要仿真参数如表 1 和表 2 所示。

主辅星位置与轨迹由表 1 中的参数决定, 在该组星历参数下, 主辅星在一次成像时间内构成平行构型, 基线长度 $\Delta x = 1234$ m。表 2 设计了主辅星成像模式均为滑动聚束模式, 一次成像时间

为 12.935 2 s, 距离向幅宽达到 6.6 km, 方位向幅宽达到 9.3 km, 理论方位分辨率可达到 0.23 m。原始回波信号距离向采样 57 578 点, 方位向采样 73 832 点。仿真中设计了均匀分布 3×3 点目标矩阵, 如图 4 所示, 其中点 A 为场景中心点, 点 B 和点 C 为场景边缘点。

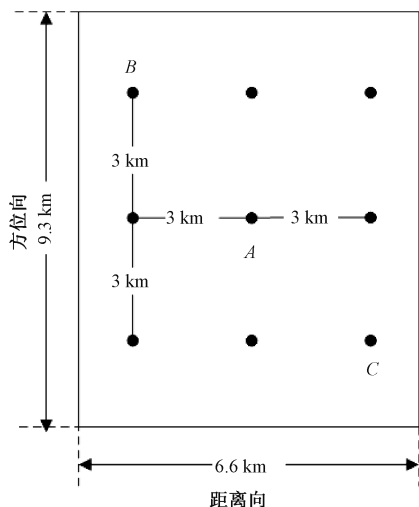


图 4 点目标分布图

Fig. 4 Distribution of point target

根据式 (8) ~ 式 (10) 可计算得到瞬时多普勒带宽 $B_{\text{inst}} = 3\,093.5$ Hz, 全场景多普勒带宽 $B_a = 39\,299.8$ Hz, 场景中心点目标带宽 $B_p = 27\,571.7$ Hz。此时 PRF 略大于 B_{inst} 但远小于 B_a 。利用本文提出的方法去除方位向混叠后, 方位向采样点扩展到 93 130 点, PRF 增加至 42 836.95 Hz。图 5(a) 表示辅星原始回波信号的方位向傅里叶变换后的结果, 可以看出方位向明显混叠。图 5(b) 表示采用文章方法去混叠后的辅星回波信号的距离多普勒域频谱。图 6 表示了场景中心点 A 和场景边缘点 C 的辅星成像结果, 其中图 6(a) 为未补偿双曲等效模型误差时目标 C 的等高线图和方位向压缩波形 (插值 64 倍), 图 6(b) 和 6(c) 分别为补偿双曲等效模型误差后目标 A 和目标 C 的成像结果 (插值 64 倍)。成像处理后场景内目标的距离分辨率大致为 0.222 m, 目标点 A 的方位向分辨率为 0.233 m, 点 B 的方位向分辨率为 0.241 m, 点 C 的方位向分辨率为 0.230 m, 且在同一方位向随着斜距增加, 方位分辨率呈递增趋势, 这一特点是由滑动聚束模式方位分辨率特性决定的^[6]。

表 3 描述了不加入模型误差补偿与加入模型误差补偿 2 种情况下场景边缘点 B、C 和场景中心点 A 的辅星成像质量。由于双曲等效模型采

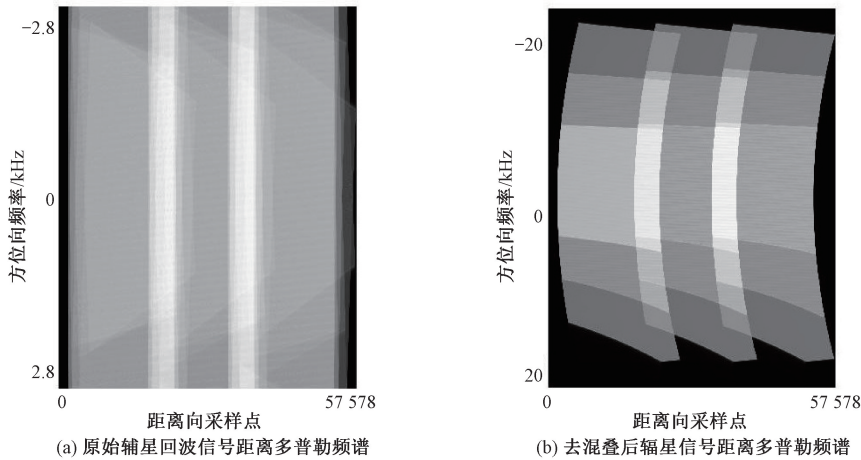


图 5 辅星信号距离多普勒频谱
Fig. 5 Range-Doppler spectrum of slave signal

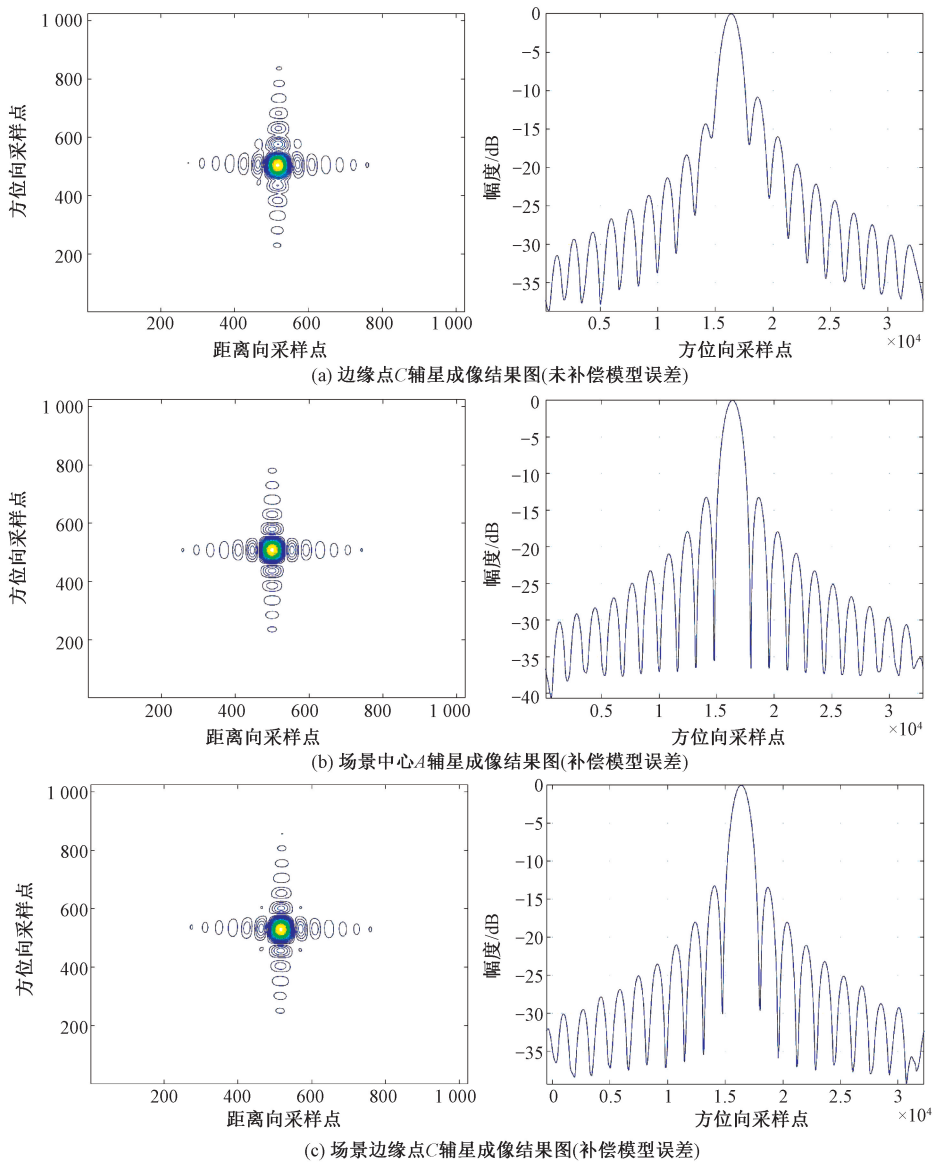


图 6 仿真点目标辅星成像结果

Fig. 6 The slave satellite's imaging results of point targets

用与场景中心点 A 完全匹配的等效斜距、速度和斜视角,所以中心点 A 在误差补偿前后变化不大且仍具有良好的聚焦质量。不加模型误差补偿时,场景边缘点出现峰值旁瓣比和积分旁瓣比偏

低以及旁瓣不对称现象;加入模型误差补偿后边缘点的成像质量有了提升,各项指标接近理想值。成像处理中方位向和距离向均为加权,可见算法对整个场景都能良好聚焦。

表 3 仿真点辅星成像处理结果指标
Table 3 Index of slave imaging processing results for simulation points dB

点目标 序号	不加模型误差补偿				加入模型误差补偿			
	距离向指标		方位向指标		距离向指标		方位向指标	
	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR
A	-13.205	-9.976	-13.213	-10.067	-13.242	-9.998	-13.240	-10.242
B	-13.224	-9.925	-11.342	-9.873	-13.172	-9.971	-13.266	-10.209
C	-13.256	-10.068	-10.851	-9.052	-13.144	-9.924	-13.248	-10.215

5 结论

本文针对双星滑动聚束模式下 SAR 的成像问题,首先分析双星滑聚模式下目标的多普勒参数沿方位向的空变性,然后结合双星双曲等效成像算法与消除方位向混叠的 SPECAN 方法,提出适用于双星滑动聚束 SAR 系统的成像算法。针对双星滑动聚束模式下,由于目标的多普勒参数沿方位向空变和一次成像时间增加导致目标聚焦质量下降的问题,提出双曲等效模型误差补偿方法,最后给出完整的双星滑动聚束 SAR 成像算法。仿真实验结果表明本文所提出的成像算法和模型误差补偿方法能够适用于高分辨率、大幅宽的双星滑动聚束 SAR 系统,成像效果好,效率高。

参考文献

[1] Yarman C E, Yazici B, Cheney M. Bistatic synthetic aperture radar imaging for arbitrary flight trajectories [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(1): 84-93.

[2] Wu Y J, Huang Y, Wu X L. A equivalent monostatic imaging algorithm for bistatic synthetic aperture radar [C] // 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Huangshan, China: IEEE, 2007: 94-97.

[3] Loffeld O, Nies H, Peters V, et al. Models and useful relations for bistatic SAR processing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(10): 2031-2038.

[4] Neo Y L, Wong F, Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93-96.

[5] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 770-780.

[6] Mittermayer J, Lord R, Borner E. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm [C] // IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). Toulouse, France: IEEE, 2003: 1462-1464.

[7] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, et al. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(9): 1993-2004.

[8] 韩冰, 张永军, 刘佳音, 等. 斜视滑动聚束 SAR 成像的 ECS 算法 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2012, 29(5): 674-680.

[9] Breit H, Fritz T, Balss U, et al. TerraSAR-X SAR processing and products [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 727-740.

[10] Yang W, Chen J, Liu W, et al. A modified three-step algorithm for TOPS and sliding spotlight SAR data processing [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(12): 6910-6921.

[11] Qiu X L, Hu D H, Ding C B. Focusing bistatic images use RDA based on hyperbolic approximating [C] // 2006 CIE International Conference on Radar. Shanghai, China: IEEE, 2006: 1-4.

[12] 魏钟铨, 陈元藻, 戎鹏志, 等. 合成孔径雷达卫星 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-8.

[13] Eldhuset K. A new fourth-order processing algorithm for spaceborne SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3): 824-835.