DOI: 10.3969/j.issn.1672-2337.2022.04.010

多模式斜视多通道 SAR 成像方法

李 强¹, 方庭柱², 蔡永华²

北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094;
 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100190)

摘 要:方位多通道技术是当前合成孔径雷达(SAR)系统主流的高分宽幅实现方式。而将方位多通 道技术与斜视波束扫描(聚束、滑动聚束、TOPS)工作模式相结合可以实现灵活的更高分辨率或者更宽幅 宽的遥感观测。然而由于斜视以及波束扫描会使得回波信号的多普勒带宽远大于通道数与脉冲重复频率 (PRF)的乘积,使得传统的多通道成像方法失效。为了解决上述问题,本文提出一种基于方位去斜加方位 重采样的多模式斜视多通道 SAR 成像方法,该方法通过对各个通道信号分别进行方位去斜以及对去斜、线 性距离走动校正(LRWC)后的信号进行方位重采样来解决方位时变的问题,使得传统的多通道成像方法可 以使用。理论分析与实验结果均验证了该方法可以处理多模式的斜视多通道 SAR 数据,并且得到聚焦良 好的图像。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 方位多通道; 斜视; 波束扫描

中图分类号:TN957.52;TN958 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2022)04-0421-08

Squinted Multichannel SAR Imaging with Several Modes

LI Qiang¹, FANG Tingzhu², CAI Yonghua²

Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Azimuth multichannel technology is the mainstream implementation method of high resolution and wide swath in synthetic aperture radar (SAR) systems. The combination of azimuth multichannel technology and squint beam steering mode (spotlight, sliding spotlight, TOPS) can realize flexible remote sensing observation with higher resolution or wider swath width. However, due to the existence of squint angle and beam steering, the Doppler bandwidth of the echo is much higher than the product of the number of channels and pulse repetition frequency (PRF), which makes the traditional multichannel imaging methods ineffective. To solve the above problems, a squinted multichannel SAR imaging with several modes based on azimuth de-squinting and azimuth resampling is proposed in this paper. This method solves the problem of azimuth time variation by desquinting the signals of each channel and azimuth resampling the signals after de-squint and linear range walk correction (LRWC), so that the traditional multichannel imaging methods can be used. Theoretical analysis and experimental results show that multi-mode squint multichannel SAR data can be processed by this method and wellfocused images are obtained.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); azimuth multichannel; squint; beam steering

0 引 言

在合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)领域,高分辨率和宽测绘带成像一直是其发展 目标,也是未来 SAR 的发展趋势。然而对于单通道 SAR,高分辨率和宽测绘带对脉冲重复频率(Pulse Repeat Frequency, PRF)的要求是矛盾的,也即经典的最小天线面积限制^[1]。即使应用了诸如聚束模式、混合聚束模式、扫描模式、TOPSAR、马赛克模式等方法^[1-3],也只能在高分辨率和宽测绘带中进行取舍,不可兼得。因此,多通道 SAR 设计已成为目前实现高分宽幅成像的主流方案^[4],并已得到 RADA-RSAT-2^[5]、TerraSAR-X^[6]、ALOS-2^[7]、高分三号^[8]

收稿日期: 2021-11-08;修回日期: 2022-02-09

基金项目:国家重点研发计划(No. 2017YFB0502702)

等星载 SAR 的验证。

方位多通道 SAR 利用相位中心偏置天线技术,通过增加接收天线来增加方位向采样率,接收的信号经均匀化处理和重新排列后可满足奈奎斯特采样定律,从而达到抑制方位模糊的目的。这样可以在使用低 PRF 采样的情况下获得方位向高分辨率的图像,实现高分宽幅。如果想要获得更高分辨率或者更大的测绘幅宽,可以将多通道与波束扫描模式结合,相关的处理方法及结果在文献[9]和[10]中给出。

斜视 SAR 可以实现灵活观测,在每次飞行期 间可以对一个区域进行多次观测,而且可以在多 个角度观测目标的后向散射信息得到目标的表面 结构信息。因此斜视 SAR 也是如今发展的一个 热点方向^[11]。

一个很自然的想法就是将多通道波束扫描模式 与斜视工作方式相结合,这样可以实现灵活的高分 宽幅对地观测,但是一些问题也应运而生。由于斜 视的工作模式,信号的多普勒中心频率在二维频域 是随着距离向频率的变化而变化的,这会产生额外 的多普勒带宽。当斜视角很大时,甚至会出现由于 多普勒中心在信号距离向带宽范围内变化过大而造 成方位频谱混叠的现象。因此,相对于正侧视时的 多通道波束扫描模式,斜视多通道波束扫描模式的 信号多普勒带宽又进一步增加了,这样在使用文献 [9]中的方法时,会使得信号在方位去斜之后的多普 勒带宽仍然大于通道数与采样率的乘积,导致后续 的重构处理仍然无法进行。

针对上述斜视多通道波束扫描模式的问题, 在结合传统斜视 SAR 成像处理的基础上,本文提 出了一种基于方位向去斜加方位重采样的方法。 在本方法中,首先对每个通道的信号分别进行线 性距离走动校正(Linear Range Walk Correction, LRWC)处理,去除由于斜视引起的多普勒带宽, 使得信号等效于正侧视时的情况。其次,再对各 个通道线性距离走动校正后的信号分别进行方位 Dechirp 处理,去除由于波束扫描引起的多普勒带 宽,此时信号的多普勒带宽小于通道数与方位采 样率的乘积,可以对各个通道的信号进行重构处 理得到重构后的信号。接着使用两步式的第一步 对信号进行等效的升采样处理得到等效的方位过 采样的单通道波束扫描模式的信号。值得注意的 是,由于在第一步进行了线性距离走动校正处理, SAR 信号的方位时不变关系被破坏,需要进行方 位重采样处理。方位重采样之后便可以使用传统 单通道波束扫描模式的处理方法进行成像处理。

1 斜视多通道波束扫描模式

为了更好地说明问题,本节首先给出正侧视 下的多通道波束扫描模式的信号特性,接着引出 斜视情况下相对于正侧视情况下的不同,最后通 过对斜视多通道波束扫描模式信号特性的分析说 明对于该模式信号现有处理方法所存在的问题。

图 1 所示为斜视多通道波束扫描模式的示意图 (以斜视多通道滑动聚束模式为例)。图中所示的是 前斜视的情况,后斜视情况下的分析与前斜视相同。 在这个系统中,通道 1 发射雷达信号,所有通道接收 回波信号。Tx 为发射通道,Rx 为接收通道。不失 一般性,假设通道 1 为参考通道,则通道 1 发射信 号,所有通道接收信号。红色箭头表示发射方向,黑 色箭头表示接收方向。其中,雷达平台运动速度为 v_s,而波束足迹在地面的运动速度为 v_g。如图所 示,在成像中心时刻,波束并不是指向雷达运动轨迹 的法线方向,而是与轨迹的法线方向有一个夹角 θ_{sq},也就是 SAR 系统工作的斜视角。





假设场景中有一点目标 P,其最近斜距为 R₀,则正侧视多通道波束扫描模式时,该点所经历的 双程天线方向图为

$$G_{a}(t_{a}) = G_{0} \operatorname{sinc}^{2} \left[\frac{L_{a}}{\lambda} \left(\frac{v_{g}t_{a}}{R_{0}} + \omega_{r}t_{a} \right) \right] = G_{0} \operatorname{sinc}^{2} \left[\frac{L_{a}}{\lambda} \frac{v_{g}t_{a}}{R_{0}} \left(1 + \frac{\omega_{r}R_{0}}{v_{g}} \right) \right]$$
(1)

式中, t_a 为方位时间, G_0 为常数增益, L_a 为天线长度, λ 为信号波长, ω_r 为波束扫描的角速度。

可以看出,就单点目标来说,可以将波束扫描模 式下的双程天线方向图等效为条带模式的方向图, 等效天线长度为条带模式下的1+ ^{ω_rR₀} (称之为滑 动因子)倍,因此,此时的单点信号的多普勒带宽为

$$B_{\rm dop} = 0.886 \frac{2v_{\rm s}}{\left(1 + \frac{\omega_{\rm r}R_{\rm 0}}{v_{\rm g}}\right)L_{\rm a}} = \frac{B_f}{\left(1 + \frac{\omega_{\rm r}R_{\rm 0}}{v_{\rm g}}\right)}$$
(2)

式中,

$$B_f = \frac{2v_s}{\lambda}\theta_{\rm bw} \tag{3}$$

为条带模式下的单点目标多普勒带宽, $\theta_{\rm bw}$ 为方位向波束宽度。

对于方位向有多点目标的情况,正侧视的多 通道波束扫描模式的时频关系图如图2所示。可 以看出,此时信号总的多普勒带宽为

$$B_{\text{total}} = B_s + B_f \tag{4}$$

式中, B_s 为由于波束扫描引起的多普勒带宽, K_{rot} 为由于波束扫描引起的多普勒中心变化的调频率, K_a 为信号的多普勒调频率。可以看出,由于波束的 扫描,方位向不同位置点目标的多普勒中心不同,产 生了额外的多普勒带宽。使得此时通道数与 PRF 的乘积远小于场景信号的多普勒带宽,即



图 2 正侧视多通道波束扫描模式信号时频关系图

在传统多通道信号中,第 m 个通道的回波信 号在多普勒域的表达式为

$$S_m(\tau, f_a) = \sum_{n=0}^{N-1} S_1(\tau, f_a + n \cdot PRF) \cdot$$

$$e^{-j2\pi\frac{\Delta x_m}{2v_s}(f_a+n\cdot PRF)}$$
(6)

$$f_{a} = \left[-\frac{N}{2} \cdot PRF, -\left(\frac{N}{2} - 1\right) \cdot PRF\right] \quad (7)$$

式中 τ 为距离向时间, f_a 为方位频率, N为信号的 模糊数, Δx_m 为第m个通道的相位中心与参考通 道相位中心的距离。

上式成立的条件是通道数与 PRF 的乘积大于 场景信号的多普勒带宽,并且上式也是传统滤波器 组重构方法的基础。因此,此时是无法直接使用传 统的多通道信号的处理方式的。但是通道数与 PRF 的乘积大于条带模式下的信号多普勒带宽:

 $M \cdot PRF > B_f$ (8) 此时可以利用文献[9]中的方法进行处理,解决传 统多通道信号重构不能应用于多通道波束扫描模 式的情况。

当处于斜视模式情况下,由于信号多普勒中 心随着距离频率的变化而变化,会产生额外的多 普勒带宽,因此在斜视情况下,公式(4)可以改为

 $B_{\text{total}} = B_s + B_{f_squint}$ (9) 式中 B_{f_squint} 为斜视条带模式下的单点信号多普勒 带宽。

$$B_{f_{squint}} = \frac{2V_{s}\cos\theta_{sq}}{\lambda}\theta_{bw} + \frac{2V_{s}B_{r}}{c}\sin\theta_{sq} \qquad (10)$$

当斜视角大到一定的程度时,可能会出现图 3 所示 的通道数与 PRF 的乘积小于信号多普勒带宽的情况,即

$$M \bullet PRF < B_{f_squint} \tag{11}$$

此时,即使是首先去除由于波束扫描引起的多普 勒带宽,信号也是无法重构的。



图 3 斜视模式下频谱混叠示意图

可见,当多通道波束扫描模式工作在斜视情况时,又会出现新的问题,即场景信号的多普勒带

宽即使去除由于多普勒中心变化导致的多普勒带 宽后,其值仍然大于通道数与 PRF 的乘积,导致现 有文献的处理方法失效。

2 斜视多通道波束扫描模式处理 方法

本节将基于第2节分析的结果,结合现有文献 的研究,提出一种基于方位去斜加方位重采样的 斜视多通道波束扫描模式的信号处理方法。

斜视多通道扫描模式下参考通道的回波信号 可以表示为

$$ss(\tau, t_{a}) = \omega_{r} \left(\tau - \frac{2R(t_{a})}{c}\right) \omega_{a}(t_{a} - t_{c}) \times \exp\left(j\pi K_{r} \left(\tau - \frac{2R(t_{a})}{c}\right)^{2}\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R(t_{a})\right)$$
(12)

式中, $\omega_r(\cdot)$ 为脉冲信号的包络, $\omega_a(\cdot)$ 为公式(1)所示的双程天线方向图, $R(t_a)$ 为等效的单程距离历程, K_r 为距离向信号调频率, t_c 为场景中心目标点的波束中心穿越时刻,c为光速, λ 为信号波长。则第m个通道的回波信号可以表示为

$$ss_m(\tau, t_a) = ss\left(\tau, t_a - \frac{\Delta x_m}{2v_s}\right)$$
(13)

首先,如前所述,由于系统工作在斜视情况 下,信号的多普勒中心频率在二维频域会随着距 离频率的变化而变化,产生额外的多普勒带宽。 因此,可以使用线性距离走动校正的方法去除斜 距历程中的线性部分,使得信号等效于正侧视时 获得的回波信号。LRWC所使用的校正函数为

$$H_{m,\text{LRWC}}(f_{\tau},t_{a}) = \exp\left(-j\frac{4\pi v_{s}\sin\theta_{sq}}{c}(f_{0}+f_{\tau})\left(t_{a}-\frac{\Delta r_{m}}{2v_{s}}\right)\right)$$
(14)

式中,f₀为信号载频,f_z为距离向频率,下标 m 表示的是第 m 个通道。需要注意的是,对于每个通 道信号而言,其 LRWC 的函数是不一样的,不同通 道信号的 LRWC 函数有一个不同的时延,这是因 为不同接收通道的等效相位中心位于不同的位 置,如公式(14),这样可以保持多通道信号的 特性。

线性距离走动校正之后,雷达平台的运动轨 迹可以等效于图 4 中的绿色虚线。

由于 LRWC 之后,因斜视引起的多普勒带宽



图 4 LRWC 示意图

被消除了,此时信号等效于正侧视情况下的回波 信号,可以使用文献[9]中所使用的方法进一步进 行方位带宽的压缩,使得信号总的多普勒带宽小 于通道数与 PRF 的乘积。于是,接下来选取方位 Dechirp 函数:

$$g_m(t_a) = \exp\left(j\pi \frac{2v_s^2}{\lambda R_{\rm rot}} \left(t_a - \frac{\Delta x_m}{2v_s}\right)^2\right) \qquad (15)$$

式中 R_{rot} 为虚拟旋转点的最近斜距。和 LRWC 函数一样,该 Dechirp 函数也是针对各个通道设置的,有一个与通道位置相关的时延。

经过 LRWC 和方位 Dechirp 之后,信号在距 离频域方位时域可以表示为

$$Ss_{m}(f_{\tau},t_{a}) = Ss\left(f_{\tau},t_{a}-\frac{\Delta x_{m}}{2v_{s}}\right) \times \exp\left(-j\frac{4\pi v_{s}\sin\theta_{sq}}{c}(f_{0}+f_{\tau})\left(t_{a}-\frac{\Delta x_{m}}{2v_{s}}\right)\right) \times \exp\left(j\pi\frac{2v_{s}^{2}}{\lambda R_{rot}}\left(t_{a}-\frac{\Delta x_{m}}{2v_{s}}\right)^{2}\right)$$
(16)

可以将上式简写为

$$Ss_{m}(f_{\tau},t_{a}) = Ss'\left(f_{\tau},t_{a}-\frac{\Delta x_{m}}{2v_{s}}\right)$$
(17)

可以看出,此时信号仍然保持着多通道信号的特性,但是方位信号的带宽已经被压缩至 M • PRF 以内了,可以进行多通道信号重构处理,重构后的 二维频域的信号为

$$SS_{a}(f_{\tau}, f_{a}) = [SS_{1}(f_{\tau}, f_{a}), \cdots, SS_{M}(f_{\tau}, f_{a})]\boldsymbol{P}(f_{a})$$
(18)

式中 $P(f_a)$ 为重构矩阵,其表达式可参考文献[9] 的公式(34)。注意,重构之后需要对信号进行逆 Dechirp 操作恢复由于波束扫描引起的多普勒带 宽,逆 Dechirp 函数为

$$g^{-1}(t_{\rm a}) = \exp\left(j\pi \frac{2v_{\rm s}^2}{\lambda R_{\rm rot}} t_{\rm a}^2\right)$$
(19)

425

后面可以看出,该操作其实可以和两步式操作中 的去斜相互抵消而直接进入两步式的后续操作。

信号重构之后,便可以将信号看作等效的正 侧视单通道滑动聚束模式信号。但是此时需要注 意的是,由于之前的 LRWC 处理,使得信号的方位 "时不变"特性被破坏,可以发现,原本同一距离门 相同的多普勒参数(如等效速度)变得不再相同。 因此,为了解决方位"时不变"特性被破坏的问题, 需要进行方位重采样恢复方位"时不变"特性^[12]。 方位重采样是将 LRWC 后的方位频谱映射到等 效的正侧视信号的方位频谱以实现等效正侧视 的效果,并使得信号具有方位"时不变"特性的方 法,该方法需要在方位频域将方位频谱进行重 采样。

方位重采样操作需要在方位频域信号和方位 时域信号都不混叠的情况下操作,于是首先需要 对信号进行"两步式"解混叠预处理操作^[13]。"两 步式"处理之后,便可以进行方位重采样处理。

等效阵列原理将斜视情况下经过 LRWC 后的 信号等效于正侧视情形下的信号,通过比较两者 的方位信号特性,得到两种情形下的信号之间的 关系,之后便使用方位重采样的方法将经过 LR-WC 处理之后的信号重采样为等效正侧视的情形。

经过 LRWC 处理后的信号方位频谱与等效正 侧视信号在二维频域中的映射关系为

$$\frac{f'_{a}}{\cos\theta_{sq}} = \cos\theta_{sq} (f_{a} + f_{dc}) - \sin\theta_{sq} \sqrt{\left(\frac{2v}{c} (f_{0} + f_{r})\right)^{2} - (f_{a} + f_{dc})^{2}}$$

式中 f'_a 为等效正侧视的信号方位频率, f_a 为经过 LRWC 处理后的信号方位频率, f_{dc} 为二维频域中 的多普勒中心频率, 且

$$f_{\rm dc} = \frac{2v_{\rm s}\sin\theta_{\rm sq}}{c}(f_{\rm 0} + f_{\rm r}) \tag{21}$$

通过求解公式(20),可以得到新的方位频率轴映 射到旧频率轴的映射关系为

$$f_{a} = \sqrt{\sin^{2}\theta_{sq} \left(\frac{2v}{c}(f_{0} + f_{r})\right)^{2} - (f'_{a} \tan\theta_{sq})^{2}} + f'_{a} - f_{dc}$$
(22)

式中, $\theta_{sq} > 0$ 时,K=1; $\theta_{sq} < 0$ 时,K=-1。

利用上式进行二维频谱的方位重采样之后,

还有一步重要的操作就是乘以一个补偿相位函数,以消除两步式预处理的卷积操作引入的相位。 补偿相位函数如下:

$$H(f_{a}) = \exp\left(j\pi \frac{\lambda R_{\text{rot}}}{2v_{s}^{2}}f_{a}^{2}\right)$$
(23)

需要注意的是,补偿函数中的 f_a 对应于公式 (22)中的 f_a,而不是公式(20)中的 f[']_a,因为两步 式操作引入的相位中使用的是旧的时间轴,对应 于旧的频率轴。补偿相位之后就可以进行成像处 理^[14]。整个的处理流程如图 5 所示。



图 5 斜视多通道波束扫描模式 SAR 信号处理流程图

3 实验分析

(20)

为了验证本文方法对于斜视多通道波束扫描 模式 SAR 信号处理的有效性,本节将进行点目标 仿真实验,对包含 9 个目标的 3×3 矩形点阵目标 进行成像仿真分析。不失一般性,本节还是以斜 视多通道滑动聚束模式为例。

仿真实验采用的 SAR 系统参数具体见表 1。 其中,天线的方位向长度是 3 m,系统的滑动因子 为 0.6,天线的方位向通道数为 2。此时,对于单点 信号来说,对应的正侧视多通道滑动聚束模式的 多普勒带宽为 B_{dop} = 214.13 Hz,对应的正侧视多 通道条带模式下的带宽为 B_f = 128.48 Hz,而公 式(10)中的斜视多通道条带模式下的带宽为 B_{f_squint}=263.81 Hz。PRF设置为83.51 Hz,可以 发现,此时通道数与 PRF 的乘积小于单点信号斜 视条带模式下的多普勒带宽,但是大于对应的正 侧视多通道条带模式下的带宽。实验结果分别如 图 6 和图 7 所示。

参数	参数值		
载频 f ₀	9.65 GHz		
速度 v _s	120 m/s		
高度 H	10 km		
下视角 θ_{view}	60°		
脉冲重复频率 PRF	83.51 Hz		
天线长度 L _a	3 m		
斜视角 θ_{sq}	25°		
距离带宽 B_r	400 MHz		
采样频率 F_s	480 MHz		
脉冲宽度 T_r	$2 \ \mu s$		
场景大小(距离×方位)	$2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$		
通道数	2		
滑动因子	0.6		

表1 系统仿真参数

图 6(a)所示为斜视多通道条带模式下的二维 频谱,使用的是 2×PRF 的采样率(即通道数与 PRF 的乘积)。可以发现,由于斜视,信号的二维 频谱在方位向发生了混叠。因此,在本节的实验 中,当直接使用文献[9]的方法进行重构后,由于 不满足滤波器组重构方法的条件,重构失败,重构 后的二维频谱是混叠的,如图 6(b)所示。本文在 重构之前同时使用了 LRWC 和方位 Dechirp,使得 信号的多普勒带宽限制在通道数与 PRF 的乘积之 内。在本文方法中重构后的二维频谱如图 6(c)所 示,重构之后的频谱是正确、不混叠的。

实验对点阵中的3个目标进行了分析,分别是 左上(P1)、中心(P5)和右下(P9)的点目标,成像结 果如图7所示。可以看出,3个点目标均聚焦良好, 无散焦现象。成像质量评估结果汇总在表2中,可 以看出3个点目标的峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比(Integrated Sidelobe Ratio, ISLR)均能达到理想值-13.26 dB和-10 dB。对于 分辨率/脉冲响应宽度(Impulse Response Width, IRW),可以通过对比理论值与实验结果来评价。可 以计算出点目标的理论分辨率为







点目标	距离向			方位向		
	IRW /m	PSLR /dB	ISLR /dB	IRW /m	PSLR /dB	ISLR /dB
理想值	0.332	-13.26	-10.0	0.496	-13.26	-10.0
P1	0.332	-13.26	-9.78	0.450	-13.27	-10.13
P 5	0.332	-13.25	-9.77	0.462	-13.26	-10.15
P9	0.332	-13.26	-9.78	0.471	-13.26	-10.14

方位向:
$$\rho_a = 0.886 \frac{v_s}{B_f} \cdot A = 0.496 \text{ m}$$

距离向: $\rho_r = 0.886 \frac{c}{2B_r} = 0.332$ m

对比表2中的数据可以发现,实验结果的分辨 率与理论值一致,说明了本文方法在斜视多通道 波束扫描模式下的有效性。

4 结束语

方位多通道在现在的高分宽幅 SAR 系统中 发挥着重要作用,而波束扫描模式的方位多通道 模式可以在进一步提高方位向分辨率的同时保持 距离向测绘幅宽不变。SAR 工作在斜视情况下可 以实现灵活的对地观测,因此斜视多通道波束扫 描模式有实用价值。本文首先介绍了斜视多通道 波束扫描模式下的问题,即由于斜视会引起多普 勒中心频率在距离向信号的频带内变化,进而使 得各通道信号去斜后的带宽仍然大于通道数与 PRF 的乘积。接着本文基于现有文献,提出了一 种基于方位去斜加方位重采样的方法,该方法首 先对各个通道的信号分别进行 LRWC 处理,去除 由于多普勒中心频率随着距离频率的变化而变化 引起的带宽;其次,使用方位去斜加重构的方法得 到重构后的信号;最后使用方位重采样的方法将 经过 LRWC 之后的重构信号等效为正侧视信号, 然后补偿相位之后即可进行成像处理。在文章的 最后,给出了 3×3 点阵目标的仿真实验结果,并取 3 个点目标进行分析,可以看出,使用本文方法处 理后,点目标均聚焦良好,质量参数也能达到理想 数值,证明了本文所提出方法的有效性。本文的 方法使得多通道波束扫描模式下的 SAR 系统的 灵活观测成为可能。

参考文献:

- [1] 邓云凯, 禹卫东, 张衡, 等. 未来星载 SAR 技术发展 趋势[J]. 雷达学报, 2020, 9(1):1-33.
- [2] 韦维,朱岱寅,吴迪. 机载 SAR 多模式统一化成像处理 技术研究[J]. 雷达科学与技术, 2020, 18(6):625-632.
- [3] SUN G C, LIU Y B, XIANG J X, et al. Spaceborne Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithms: An Overview[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021(10):2-25.
- [4] MOREIRA A, PRATS-IRAOLA P, YOUNIS M, et al. A Tutorial on Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2013,1(1):6-43.
- [5] MOON W M, STAPLES G, KIM D J, et al. RADA-

RSAT-2 and Coastal Applications: Surface Wind, Waterline, and Intertidal Flat Roughness[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5):800-815.

- [6] WERNINGHAUS R, BUCKREUSS S. The TerraSAR-X Mission and System Design[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2):606-614.
- [7] KARVONEN J, RINNE E, SALLILA H, et al. On Suitability of ALOS-2/PALSAR-2 Dual-Polarized SAR Data for Arctic Sea Ice Parameter Estimation [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(11):7969-7981.
- [8] 孙吉利, 禹卫东, 邓云凯. 高分三号卫星 SAR 工作模式与载荷设计[J]. 航天器工程, 2017, 26(6):61-67.
- [9] FANG T Z, DENG Y K, LIANG D, et al. Multichannel Sliding Spotlight SAR Imaging: First Result of GF-3 Satellite[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60(1):1-16.
- [10] FANG T Z, ZHANG H, LIANG D, et al. A Channel Phase Error Estimation Method for Multichannel TOPS and Multichannel Sliding Spotlight SAR Imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021,19:1-5.
- LUO Y, ZHAO F J, LI N, et al. A Modified Cartesian Factorized Back-Projection Algorithm for Highly Squint Spotlight Synthetic Aperture Radar Imaging
 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(6):902-906.
- [12] XING Mengdao, YU Feng, et al. Azimuth Resampling Processing for Highly Squinted Synthetic Aperture Radar Imaging with Several Modes[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52 (7):4339-4352.

(上接第420页)

[14] 张海龙,李赛辉,张宁,等. 某雷达杂波数据分析及杂 波图技术研究[J]. 雷达与对抗,2020,40(1):22-26.
[15] LV Min, YI Jianxin, WAN Xianrong, et al. Target Tracking in Time-Division-Multifrequency-Based Passive Radar [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8):4382-4394.

作者简介:



邹俊杰 男,1996年生,江苏南通人, 硕士研究生,主要研究方向为外辐射 源雷达目标检测。

- [13] LANARI R, TESAURO M, SANSOSTI E, et al. Spotlight SAR Data Focusing Based on a Two-Step Processing Approach[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2001,39(9):1993-2004.
- [14] LIANG D, ZHANG H, FANG T Z, et al. A Modified Cartesian Factorized Backprojection Algorithm Integrating with Non-Start-Stop Model for High Resolution SAR Imaging[J]. Remote Sensing, 2020, 12 (22):3807.

作者简介:



李强 男,1979年生,山西榆次人, 博士,助理研究员,主要研究方向为航 天工程总体。



方庭柱 男,1996年生,安徽合肥人, 博士研究生,主要研究方向为星载 SAR信号处理。





程 **丰** 男,1975 年生,湖北黄冈人, 武汉大学电子信息学院副教授、硕士 生导师,主要研究方向为新体制雷达 及其信号处理。



万显荣 男,1975年生,湖北天门人, 博士,武汉大学电子信息学院教授、博 士生导师,主要研究方向为新体制雷 达设计,如外辐射源雷达、高频雷达系 统及信号处理。