

脉冲体制毫米波 SAR 多通道信号处理方法研究

吴思利^{1,2}, 王 辉^{1,2}, 肖明喜^{1,2}, 郭禹杉^{1,2}, 付玉龙^{1,2}

(1. 上海卫星工程研究所上海市毫米波空天信息获取及应用技术重点实验室, 上海 201109;

2. 上海航天技术研究院毫米波成像技术重点实验室, 上海 201109)

摘要:为实现高分辨率、宽测绘带的综合观测目的,以毫米波频段多通道合成孔径雷达(SAR)信号模型为基础,对同时具备距离多通道、方位多通道的 SAR 成像处理流程进行分析,针对非均匀通道重构容易受到姿态误差影响的问题,引入惯导设备姿态数据实现参数校准,并基于上海卫星工程研究所 Ka 频段多通道 SAR 机载挂飞数据完成方法验证。数据处理结果表明:通过二维多通道数据处理,能够有效改善欠采样下的 SAR 图像方位模糊特性并优化噪声特性,提升图像可判读性。研究结果可为毫米波多通道 SAR 成像系统的研制与应用处理提供参考。

关键词:毫米波;合成孔径雷达(SAR);多通道;模糊抑制;数据重构

中图分类号: TN 911.73; TP 391.9

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.015

Research on Multi-channel Signal Processing Method for Pulsed Millimeter-Wave SAR

WU Sil^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, XIAO Mingxi^{1,2}, GUO Yushan^{1,2}, FU Yulong^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Remote Sensing and Millimeter Wave Information Acquisition and Application Technology, Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. Key Laboratory of Millimeter Imaging, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to achieve the comprehensive observation with high resolution and wide swath, the processing flow for synthetic aperture radar (SAR) imaging with both range multi-channel and azimuth multi-channel is analyzed based on the multi-channel SAR signal model in the millimeter wave band. In view of the problem that the non-uniform channel reconstruction is easily affected by attitude errors, the inertial navigation equipment attitude data are introduced to achieve parameter calibration. The method is verified based on the Ka-band multi-channel SAR airborne flight data of Shanghai Institute of Satellite Engineering. The data processing results indicate that the azimuth ambiguity characteristics of SAR images under under-sampling can be effectively improved, the noise characteristics can be optimized through two-dimensional multi-channel data processing, and thus the interpretability of the images is much improved. The research results can provide a reference for the development and application of millimeter-wave multi-channel SAR imaging system.

Key words: millimeter wave; synthetic aperture radar (SAR); multi-channel; ambiguity mitigation; data reconstruction

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率、宽覆盖的成像观测雷达,与一般的光学遥感传感器相比,能够全天时获取信息,也相对不易受到云雨雾等自然气候影响^[1]。

近些年来,凭借高分辨率和全天时的工作能力, SAR 已经成为地球观测的主要手段之一。世界众多国家研制并发射了成像雷达卫星,获取了大量要素丰富、信息独特的雷达数据,在包括灾害监测、地球物理以及民生测绘等诸多方面发挥了突出作用。

收稿日期:2022-02-28; 修回日期:2022-04-08

作者简介:吴思利(1996—),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为雷达信号处理。

通信作者:王 辉(1972—),女,博士,研究员,主要研究方向为星载毫米波 SAR 体制。

但宽幅成像与超高分辨率对于 SAR 的实现提出了相矛盾的要求,无法同时实现宽测绘带与高分辨率^[2]。

面向高分宽幅的图像产品需求,德国的 SUESS 和 WIESBECK 率先提出了包含距离向数字波束合成(Digital Beam Forming, DBF)的两维多波束系统概念,该系统能够显著克服方位欠采样与距离幅宽限制,弥补小天线发射孔径面积带来的增益损失。基于接收端数字波束合成,可通过接收波束锐化补偿大幅宽覆盖的发射波束增益损失,实现高增益获取^[3]。这个方法在空域滤波的角度上,能够实现方向性的回波加权,进而抑制单帧数据的底噪,并且有利于距离模糊抑制;而方位多通道技术能够通过数据的多普勒谱重构,同时实现大脉冲重复间隔并保证高分辨率^[4-14],在非等效偏置相位中心构型下需要精确已知传递函数。

上述通过多个冗余通道进行复杂合成的技术途径在部分文献中也被称为智能多孔径雷达(Smart Multi-aperture Radar, SMART),主要是通过增加数据自由度实现高效能^[15-18]。

多通道 SAR 实践的关键在于配套的处理算法,针对不同任务目的形成各异的处理流程。在具体多通道成像技术上,王岩飞等^[19]在超高分辨率多通道合成上实现了优于 0.1 m 分辨率的运动误差补偿和成像处理,主要是围绕基于多通道方案的宽带信号形成技术实现了全流程验证。刘光炎等^[20]详细分析了非均匀采样 SAR 信号的频谱模糊,利用周期性时间偏移频谱重构方法重建信号频谱,并通过挂飞数据进行了验证。王鹏波等^[21]推导了由方位向周期性非均匀采样所造成的虚假目标位置与强度的计算公式,并结合成像处理过程分析了成像处理算法对虚假目标的影响,给出了二维成像处理后所得到的虚假目标强度计算公式。郑世超等^[22]在毫米波频段设计了面向干涉的多通道系统,并应用多通道数据进行了运动补偿与扫描接收通道合成处理,得到了较好的信号增益提升。

以上研究没有针对具体毫米波二维多通道数据进行的实测数据处理理论及验证,因此有必要开展面向非理想平台姿态下距离、方位多通道 SAR 信号处理应用与分析。

1 多通道信号模型

SAR 的性能表现受到一系列指标、架构影响,

无法通过单一设计实现全部用户需求。其中单通道(一发一收)系统是复杂构型的实现基础,其各项约束也是先进系统企图优化的目标,这些目标包括但不限于功率代价、最大幅宽、最优分辨率之间的固有矛盾。对此,多通道 SAR 的优点如下:理论功率代价较低,对分布式组件要求较低,适合应用在非相控阵体制上,能实现分辨率与幅宽解耦,更依赖于数字定标。下述分析单通道的局限性与多通道模型。

1.1 单通道局限性分析

类似于其他脉冲雷达体制,SAR 信噪比和最优分辨率之间的矛盾能够通过接收端口的雷达方程表示为

$$R_{SN} = \frac{P_r}{N_r} = \frac{P_t G_A A_e \sigma G_r G_a}{(4\pi)^2 R^4 L_{sys} L_{atm} k T F_N B_N} \quad (1)$$

式中: R_{SN} 为信噪比; P_t 为发射功率; G_A 为天线增益; A_e 为考虑效率的天线有效口径; σ 为场景的雷达截面积; G_r 为距离向处理增益; G_a 为方位向处理增益; R 为斜距; L_{sys} 为系统损耗; L_{atm} 为大气损耗; k 为玻尔兹曼常数; T 为接收噪声温度; F_N 为接收噪声系数; B_N 为接收有效噪声带宽。

容易发现带宽项的增大等效于噪声功率的放大,因此存在距离向分辨率和发射功率的矛盾。由于考虑到天线增益的存在:

$$G_A = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2)$$

式中: λ 为波长。

场景幅宽近似为

$$W_g = R\lambda/H_r \quad (3)$$

式中: H_r 为天线高度。

即高增益需要大天线口径,但会减少 3 dB 幅宽。通过上述分析易知为了获得大幅宽主要有 3 种方式:1) 更宽的天线主瓣宽度;2) 更远的雷达-场景距离;3) 灵活的波束指向方式。而根本上来说任何方式都会降低单位面积目标的能量增益,进而降低信噪比。而另一项对幅宽的强制约束是 SAR 接收窗口会在低脉冲周期(PRI)下收窄,表示为

$$i \cdot P_{PRI} + T_p \leq \frac{2R_n}{c} \quad (4)$$

$$(i + 1) \cdot P_{\text{PRF}} \geq \frac{2R_f}{c} + T_p \quad (5)$$

式中: i 为自由空间内脉冲序号; T_p 为发射时宽; R_n 、 R_f 分别为测绘带最近斜距和最远斜距。

而脉冲重复频率为方位向采样率,需要随分辨率增高而增高,且有

$$P_{\text{PRF}} > B_a \quad (6)$$

式中: B_a 为方位向带宽。

在方位向不同采样率、不同处理带宽下进行方位模糊对比,对比结果如图 1 所示,能够发现采样频率增大会降低方位模糊。因此,雷达模糊会在重频较低时迅速抬高,难以同时实现大幅宽与无模糊的方位高分辨。

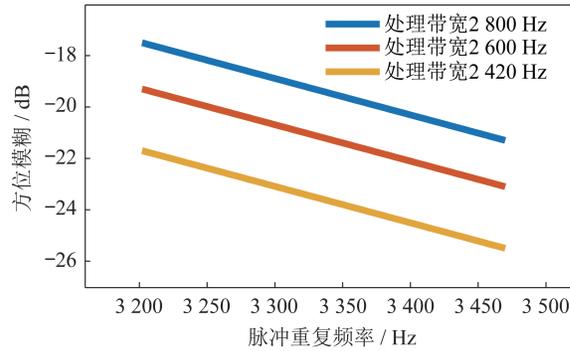


图 1 方位模糊对比

Fig. 1 Azimuth ambiguity comparison

1.2 脉冲体制毫米波多通道 SAR 模型

对此,一发多收的二维多通道信号斜距历程可表示为

$$R = R_T + R_{mn} = R(p_0, p_t) + R(p_t, p_{mn}) \quad (7)$$

式中: $R(p_0, p_t)$ 为发射天线到目标的斜距,为公共项; $R(p_t, p_{mn})$ 为目标到接收天线的接收斜距; p_0 为发射天线坐标; p_t 为点目标坐标; p_{mn} 为距离向第 m 行、方位向第 n 列处的接收通道坐标。

如图 2 所示,在斜距平面多通道上, $\theta(t)$ 为快时间变化的理想回波方向, β 为阵面实际指向, $\alpha(t) = \beta - \theta(t)$ 为回波与天线法向角度差即扫描角, $R(t)$ 为斜距。在图 2 中方位向处,多通道沿速度矢量分布,理想条件下需要具备相同的链路增益、天线方向图空间特性, d_a 为通道方位向间距。

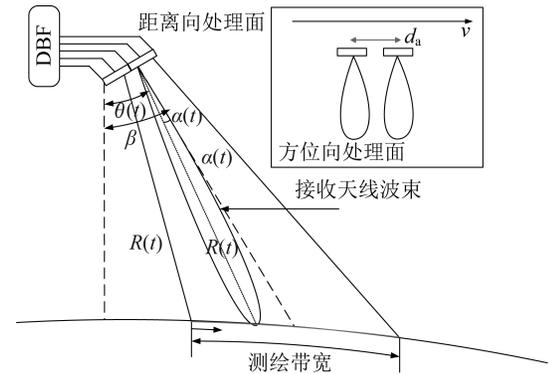


图 2 观测模型

Fig. 2 Observation model

正侧视目标距离等式进行抛物线近似后,其单通道回波信号能够近似表示为

$$S_{mn} = \omega_r \omega_a \exp\left(-j \frac{4\pi R_0}{\lambda}\right) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda r_0} t_m^2\right) \cdot \exp\left[j\pi K_r \left(t - \frac{R_{mn}}{c}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中: ω_r 为距离向窗口; ω_a 为方位向窗口; R_0 为中心斜距; t_m 为方位向时间; K_r 为距离向调频率。

而对特定第 (m, n) 通道接收信号有

$$s_{mn} \approx \omega_r \cdot \omega_a \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi(2R_0 + m \cdot d_r \cdot \sin(\alpha(t_r)))}{\lambda}\right) \cdot \exp\left[j\pi K_r \left(t_r - \frac{2R(\eta)}{c}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j\pi K_a \left(t_m - \frac{n \cdot d_a}{2v}\right)^2\right] \cdot \exp\left(-j\pi \frac{(n \cdot d_a)^2}{2\lambda R_0}\right) \quad (9)$$

式中: d_r 为通道距离向间距; K_a 为方位向调频率。

将多通道信号重构为单一信号的过程是对二维模糊的抑制,而在阵列信号处理的角度也能理解为横纵的空域滤波。即在非超高分辨率情况下,距离向的多通道会在斜距项上增加与波达角相关的调制项距离向处理时,存在的主要实测数据处理问题是阵列与回波的波达角方向误差,以及场景方位空变、回波展宽、大带宽色散等问题。对此,波达角误差以及回波展宽引起的增益下降主要是源于波束合成对于脉冲压缩处理天线加权的改变,造成等

效窄波束扫描受到的并不是主瓣调制。上述恶化对应的等效方向如图 3 所示, 前级等效空间角范围

小于后级滤波器带宽时, 就会造成不能恢复的信号损失。

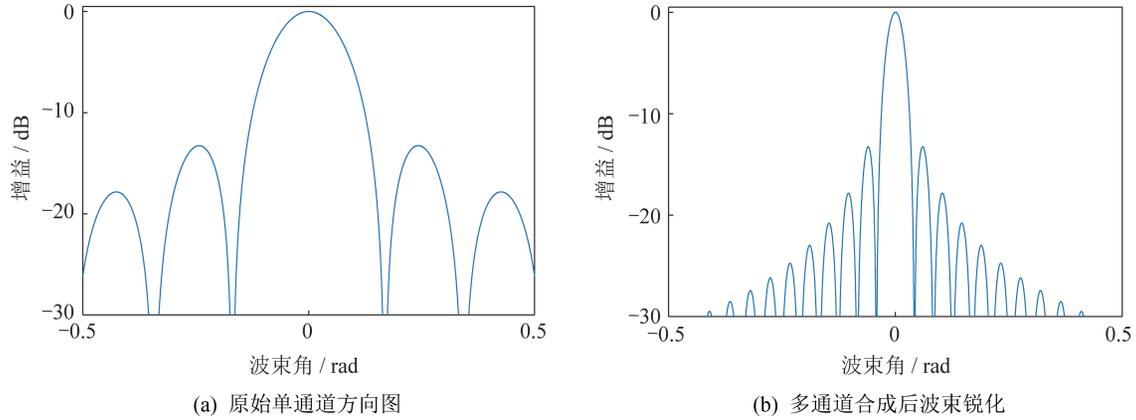


图 3 距离向波束锐化对比

Fig. 3 Comparison of range beam sharpening

在方位向上, 符合等效相位中心偏置条件 (Digital Phase Center Antenna, DPCA) 的多通道 SAR 系统能够实现等间隔采样, 通过空间冗余降低时间冗余, 缓解时序压力, 其重频、速度、天线间距为

$$P_{\text{PRF}} = \frac{2 \cdot v}{n \cdot d_a} \quad (10)$$

式中: n 为正整数。

TerraSAR-X、Radarsat-2 都设计了符合 DPCA 的工作模式, 可以直接使用单通道 SAR 成像算法进行后处理。然而大多数的方位多通道 SAR 应用场景都不符合理想条件, 根据带限信号采样定理, 可以用多个低采样方位多通道通过传递函数的逆实现重构。在 SAR 系统响应上, 多个以 PRF 为采样率的独立通道传递函数有

$$H(f_a) = \begin{bmatrix} H_1(f_a) & \cdots & H_N(f_a) \\ \vdots & & \vdots \\ H_1(f_a + (N-1)P_{\text{PRF}}) & \cdots & H_N(f_a + (N-1)P_{\text{PRF}}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于线性处理过程, 其采用下列的重建滤波器能完成无差恢复:

$$P(f_a) = H^{-1}(f_a) = \begin{bmatrix} P_{11}(f_a) & \cdots & P_{1N}(f_a + (N-1)P_{\text{PRF}}) \\ \vdots & & \vdots \\ P_{N1}(f_a) & \cdots & P_{NN}(f_a + (N-1)P_{\text{PRF}}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

2 结合运动补偿的二维多通道 SAR 成像处理

由于运动平台的不稳定性, 不可避免地会带来成像质量的下降, 对此需要针对多通道数据特点进行补偿修正。由于光速恒定性, SAR 成像就是对斜距-相位-时间三者关系的重构, 而联系到 SAR 数据在快时间-慢时间-多次独立采集维度构成距离向-方位向-相参数据组, 如果实测数据获取时 SAR 在位置和三维姿态任何一个连续过程中发生偏移或者割裂, 都会大幅提高信号处理难度。

从解包后的原始数据开始, 数字处理环节包括预处理、距离向多通道合成、方位向多通道重构 3 个部分: 1) 预处理完成 AD 采样后的正交解调、半带滤波、抽取、脉冲压缩; 2) DBF 应用时序输入的惯导数据更新 DBF-SCORE 权, 最后依次进行通道间固定幅度校正、通道波达角相位补偿、通道合成及聚焦处理; 3) 方位向重构采用传递函数的逆进行数据组帧, 实现方位模糊抑制。

2.1 预处理

预处理对如图 4 所示的中频回波进行正交解调, 并进行数字下变频, 得到复数的数据矩阵, 相较于模拟解调能够得到更好的正交性。下变频结果如图 5 所示。在基带进行解调后由于过采样, 通过距离向多抽一降低总数据量。

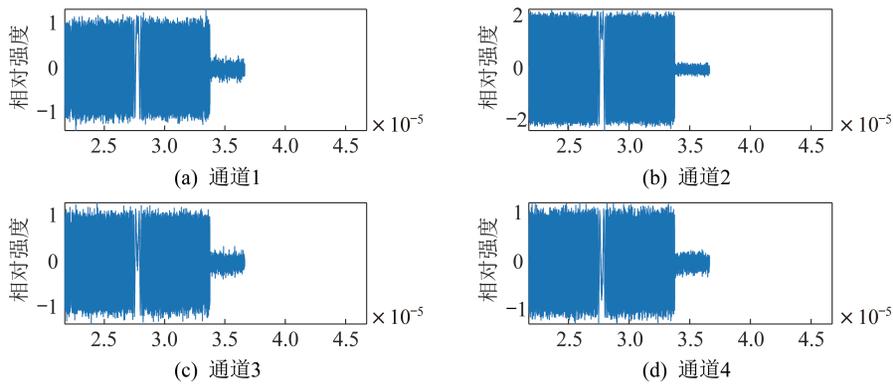


图 4 原始中频回波

Fig. 4 Raw data

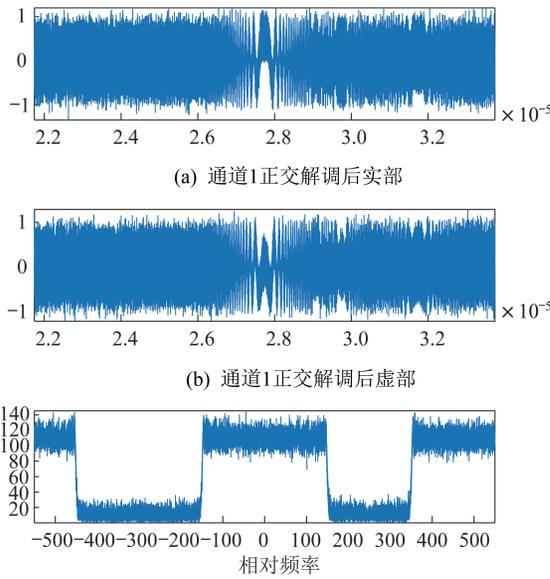


图 5 解调后基带信号

Fig. 5 Baseband data after demodulation

2.2 距离向多通道合成

距离向采用先进行脉冲压缩再通道数字波束合成的方法,处理内容如图 6 所示。基带信号先进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)到频域,经过匹配滤波器 $H(f)$ 完成脉压后再进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)回到时域,之后由扫描加权函数 $\omega_N(t)$ 弥补不同通道由传播历程带来的相位差。

距离向处理时可以进行通道间幅相补偿,进行固定幅度补偿、相位补偿以及高阶相位补偿。加权求和就相当于在方向图上形成了 4 个小阵面综合得到的大阵面,且具有快时间时变特性,重复周期内扫描整个测绘带,跟踪接收地面回波^[23-25]。

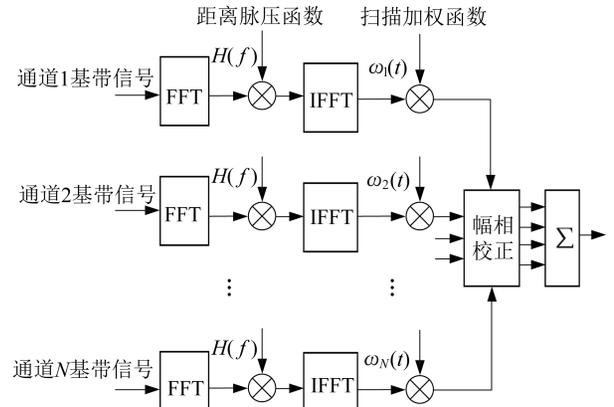


图 6 距离向处理流程

Fig. 6 Range processing flow

2.3 方位向多通道重构

方位向上若采用 N 个以 PRF 为方位采样率的多通道系统,总采样率能等效为具有 $N \cdot P_{PRF}$ 采样率的单基采样,通过多普勒频谱重构的方法可以无模糊重构带宽小于 $N \cdot P_{PRF}$ 的带限信号,其 $N \cdot P_{PRF}$ 带宽被分为多个子带,得

$$\left[-N \cdot \frac{P_{PRF}}{2} + (n-1) \cdot P_{PRF}, -N \cdot \frac{P_{PRF}}{2} + n \cdot P_{PRF} \right] \quad (13)$$

相对于单基响应,方位向的多通道会增加一次和零次的相位调制,即时延项和固定相位调制项。在二阶近似下多通道系统的传递函数如图 7 所示,地物回波在单基响应基础上,依次收到天线方向图加权、相位中心沿航迹投影偏置引起的时间及相位调制、距离向阵列波达角调制。在处理环节依次完成逆向补偿就能重构单一回波。

在距离向处理环节中由于涉及距离脉压,一般前置先完成,再将波达角调制项在距离合成中去除。以

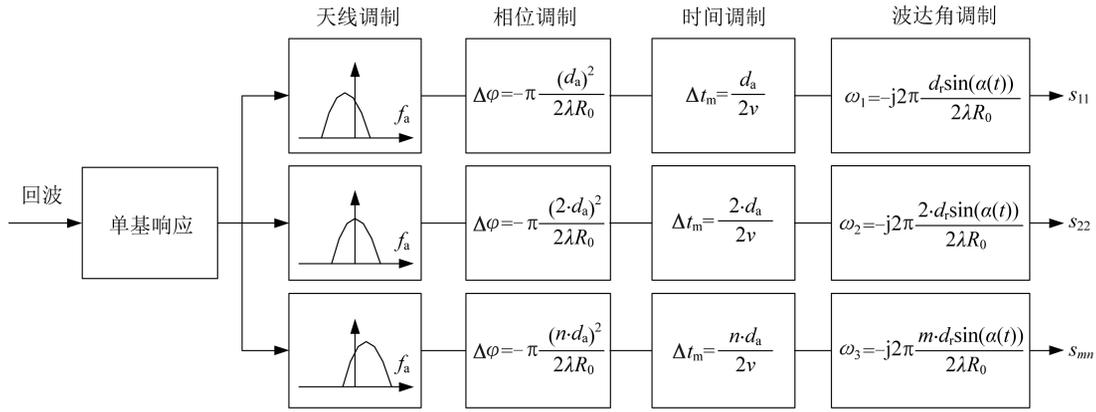


图 7 多通道接收等效方位向传递函数

Fig. 7 Equivalent azimuth transfer function for multi-channel receiving

双通道为例,多通道方位系统频域通道响应为

$$H_1(f_a) = \exp\left(-j\pi \frac{d_1^2}{2\lambda R_0}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{d_1}{2v} f_a\right) \quad (14)$$

$$H_2(f_a) = \exp\left(-j\pi \frac{d_2^2}{2\lambda R_0}\right) \cdot \exp\left(-j2\pi \frac{d_2}{2v} f_a\right) \quad (15)$$

考虑到 2 个通道分别的幅度修正项 A_1 、 A_2 , 重构函数为

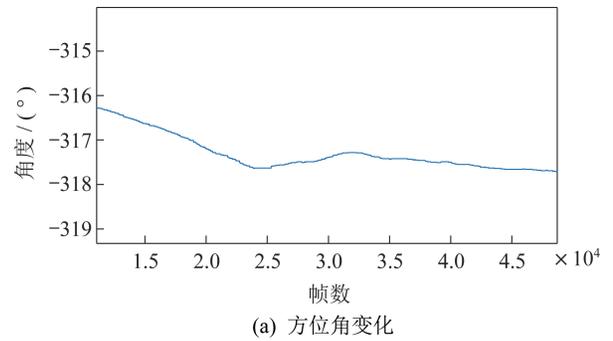
$$P(f_a) = \frac{1}{\exp\left(-j\pi \frac{d_2^2}{v} P_{\text{PRF}}\right) - \exp\left(-j\pi \frac{d_1}{v} P_{\text{PRF}}\right)} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \cdot \exp\left(j\pi \frac{d_1^2}{2\lambda R_0} + j\pi \frac{d_1}{v} f_a - j\pi \frac{d_1}{v} P_{\text{PRF}}\right) & -A_1 \cdot \exp\left(j\pi \frac{d_1^2}{2\lambda R_0} + j\pi \frac{d_1}{v} f_a\right) \\ -A_2 \cdot \exp\left(j\pi \frac{d_2^2}{2\lambda R_0} + j\pi \frac{d_2}{v} f_a - j\pi \frac{d_2}{v} P_{\text{PRF}}\right) & A_2 \cdot \exp\left(j\pi \frac{d_2^2}{2\lambda R_0} + j\pi \frac{d_2}{v} f_a\right) \end{bmatrix} \quad (16)$$

SAR 载具平台运动需要维持匀速直线运动,理想条件下能直接应用重构函数。但由于轨道在宏观上是非线性的,在多通道处理、超高分辨率处理时都需要定量化修正相位中心的空间历程。尤其在机载 SAR 成像时,飞机受到气流、载具稳定性、驾驶员操作影响巨大,会有高频的抖动和低频的三轴滚动。在机载数据获取中,常见的运动误差包括天线阵列的方向误差和速度非均匀,可以将多通道传递函数通过惯导器或者回波估计扩展为序列值,修正斜距项、速度项、重频或者天线沿航迹偏置量。

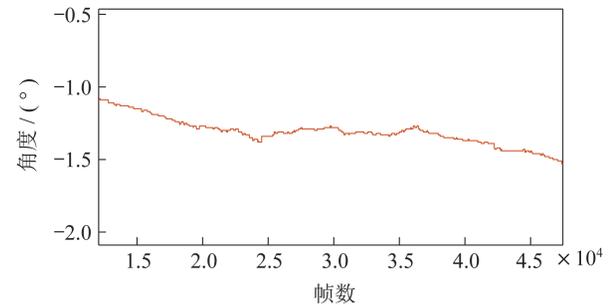
3 实测数据处理与数据分析

3.1 惯导数据分析

在实测数据分析中,利用惯导分析天线阵列是否能保持匀速直线运动,得到一组 4 万帧长的三轴姿态以及平台速度数据,如图 8 所示。



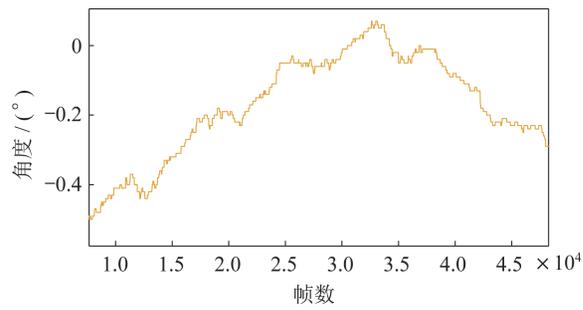
(a) 方位角变化



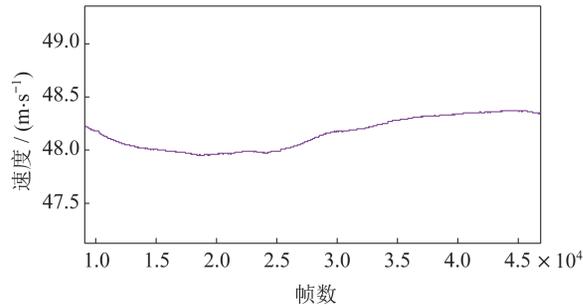
(b) 俯仰角变化

图 8 惯导数据

Fig. 8 Inertial navigation data



(c) 横滚角变化



(d) 速度变化

续图 8 惯导数据

Continue fig. 8 Inertial navigation data

毫米波波长短,容易由方向抖动引起较大的相位跃动,在此段数据中能够发现横滚角较为平稳,而方位角有接近 2° 的抖动。总结姿态特征见表1。需要注意在姿态补偿时由于原始惯导数据是时序

序列,如果在频域补偿需要进行时频变换。

表 1 姿态特征

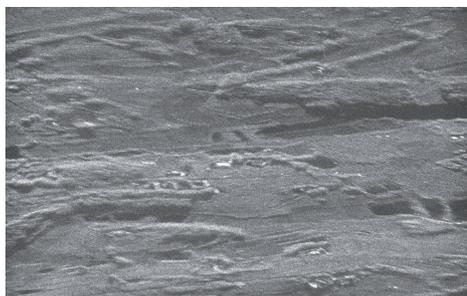
Tab. 1 Motion properties

运动误差类型	数值范围	拟合类型
方位角误差/ $^\circ$	316.0~318.0	线性
俯仰角误差/ $^\circ$	-1.0~-1.5	线性
横滚角误差/ $^\circ$	-0.5~0.1	二次
速度误差/ $(m\cdot s^{-1})$	48.0~48.3	近似平稳

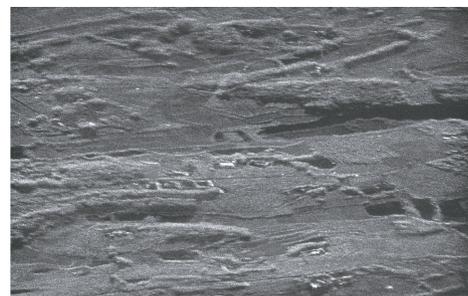
3.2 实测数据处理结果

通过毫米波多通道 SAR 实测数据进行方法验证,工作模式为二维多通道欠采样一发多收,方位向采样频率小于 3 dB 带宽。成像观测区域为湖北省荆门市郊外,截取的测绘带场景面积约为 2 km^2 。

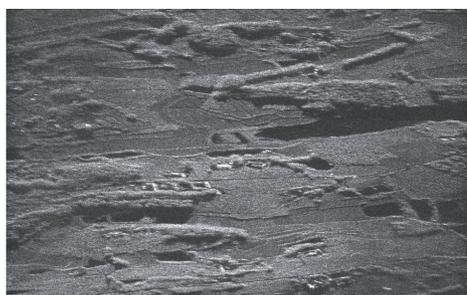
如图 9(a)和图 10(a)所示,场景在单通道下有强方位模糊,强点、均匀场景都产生了虚假目标;如图 9(b)和图 10(b)所示,在非均匀重构下,模糊强度明显下降,但仍会在水面等低功率区失去可判读性;如图 9(c)和图 10(c)所示,考虑阵列非理想姿态、速度补偿的非均匀重构,基本消除了方位模糊;如图 9(d)和图 10(d)所示,经过距离向、方位向处理,图像对比度较好,噪声、模糊都得到了抑制。



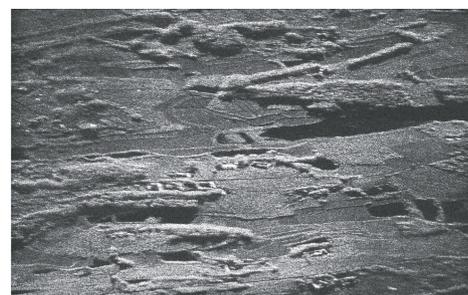
(a) 单通道图像



(b) 非均匀重构



(c) 运补下非均匀重构



(d) 二维多通道

图 9 成像效果对比

Fig. 9 Imaging comparison

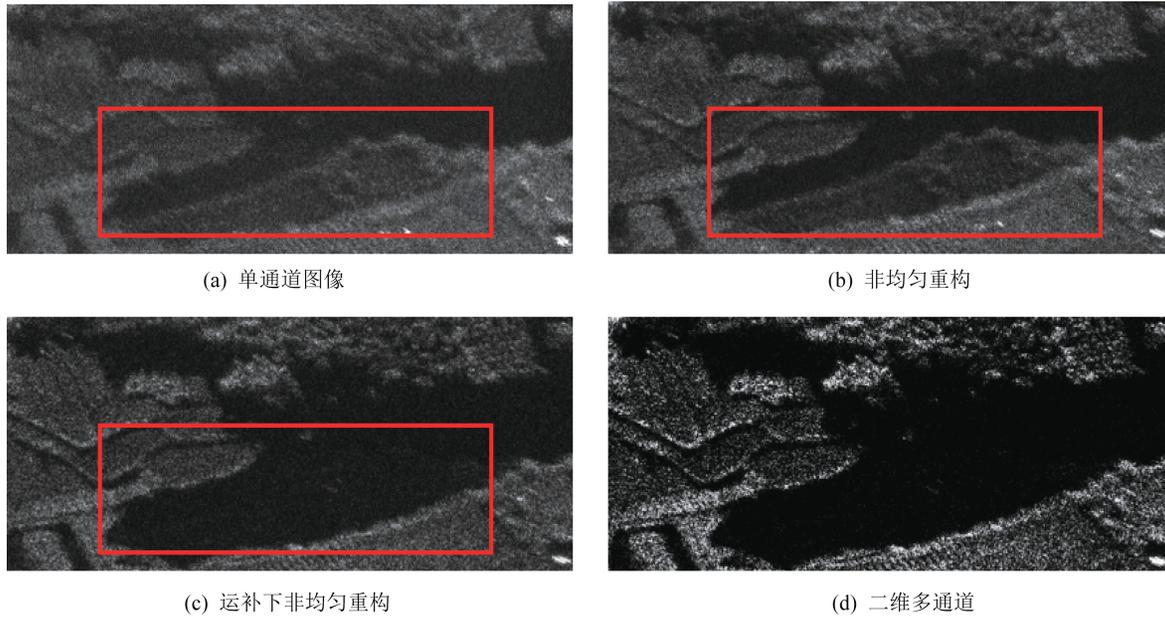


图 10 区域方位模糊抑制对比

Fig. 10 Comparison of regional azimuth ambiguity mitigation

以图像中强点进行量化分析,非均匀重构相比于单通道图像的方位模糊比下降 1.72 dB,运补下非均匀重构相比单通道图像的方位模糊比下降 6.47 dB。进行距离向剖面对比,能够发现场景合成较为均匀,未出现与单通道图像的幅度低次调制差异。多通道合成距离剖面对比如图 11 所示。

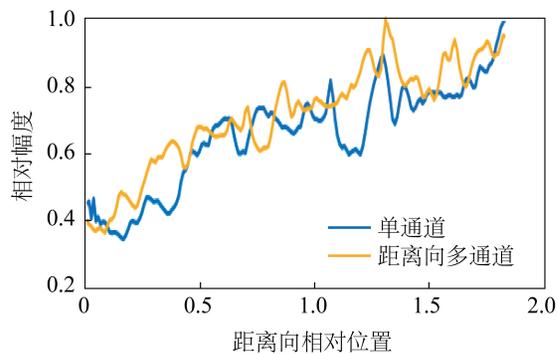


图 11 多通道合成距离剖面对比

Fig. 11 Comparison of DBF profiles

4 结束语

本文研究了毫米波频段二维多通道 SAR 数据处理问题。对完成方位向多通道重构、距离向多通道合成进行了方法分析,并基于挂飞样机数据完成方法验证。但是,本文未考虑方位多通道噪声特性、天线方向图差异等因素,因此后续将研究能最优多通道重构的信号处理方法。

参考文献

- [1] 王辉,赵凤军,邓云凯.毫米波合成孔径雷达的发展及其应用[J].红外与毫米波学报,2015,34(4):452-459.
- [2] 吴思利,王辉,郑世超,等.Ka数字波束合成-合成孔径雷达顺轨干涉性能分析[J].上海航天,2021,38(1):72-79.
- [3] SÜB M, GRAFMÜLLER B, ZAHN R. A novel high resolution, wide swath SAR system [C]// IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217). 2001: 1013-1015.
- [4] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 260-264.
- [5] GEBERT N, KRIEGER G, MOREIRA A. Digital beamforming on receive: techniques and optimization strategies for high-resolution wide-swath SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 564-592.
- [6] GEBERT N, KRIEGER G, MOREIRA A. Digital beamforming for HRWS-SAR imaging: system design, performance and optimization strategies [C]// 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. 2006: 1836-1839.

- [7] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 46(1): 31-46.
- [8] DE ALMEIDA F Q, YOUNIS M, KRIEGER G, et al. An analytical error model for spaceborne SAR multichannel azimuth reconstruction[C]// *International Conference on Radar Systems (Radar 2017)*. 2017: 1-6.
- [9] KRIEGER G, MOREIRA A. Spaceborne bi-and multistatic SAR: potential and challenges [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(3): 184-198.
- [10] HUBER S. Spaceborne SAR systems with digital beamforming and reflector antenna [R]. *Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V.*, 2014.
- [11] SIKANETA I, GIERULL C H, CERUTTI-MAORI D. Optimum signal processing for multichannel SAR: with application to high-resolution wide-swath imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6095-6109.
- [12] WANG W, WANG R, DENG Y, et al. Improved digital beam-forming approach with scaling function for range multi-channel synthetic aperture radar system [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016, 10(2): 379-385.
- [13] KRIEGER G, YOUNIS M, GEBERT N, et al. Advanced digital beamforming concepts for future SAR systems[C]// *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2010: 245-248.
- [14] REZA M, SERAFINO G, OTTO T, et al. Design and performance estimation of a photonic integrated beamforming receiver for scan-on-receive synthetic aperture radar [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(24): 7588-7599.
- [15] YOUNIS M, DE ALMEIDA F Q, VILLANO M, et al. Digital beamforming for spaceborne reflector-based synthetic aperture radar, part 1: basic imaging modes [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2021, 9(3): 8-25.
- [16] YOUNIS M, DE ALMEIDA F Q, BORDONI F, et al. Digital beamforming techniques for multi-channel synthetic aperture radar[C]// *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2016: 1412-1415.
- [17] 王岩飞,刘畅,李和平,等.基于多通道合成的优于 0.1 m 分辨率的机载 SAR 系统[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(1):29-35.
- [18] 刘光炎,孟喆,胡学成.非均匀采样 SAR 信号的不模糊重构与成像[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(6):5-10.
- [19] 王鹏波,周荫清,陈杰,等.方位向非均匀采样对多通道天线星载 SAR 成像性能的影响[J]. *遥测遥控*, 2006, 27(5):8-14.
- [20] 郑世超,王辉,孙志强,等.Ka 波段机载双模式干涉 SAR 系统设计及测量精度分析[J]. *上海航天*, 2018, 35(6):1-7.
- [21] 吴思利,王辉.毫米波 SAR DBF-SCORE 成像算法及系统级验证[J]. *上海航天*, 2021, 38(2):113-118.
- [22] DE ALMEIDA F Q, YOUNIS M, KRIEGER G, et al. Multichannel staggered SAR azimuth processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(5): 2772-2788.
- [23] CHENG P, WAN J, XIN Q, et al. An improved azimuth reconstruction method for multichannel SAR using Vandermonde matrix [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 14(1): 67-71.
- [24] 王明辉,王辉,赵凤军.基于 DBF-SCORE 的 KaSAR-GMTI 信号处理方法研究[J]. *国外电子测量技术*, 2016, 6(6):22-29.
- [25] 左伟华.高分辨率宽测绘带合成孔径雷达成像模式及算法研究[D].成都:电子科技大学,2016.