

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407700

利用惯导信息的太赫兹 SAR 成像运动补偿方法研究

吴文彬¹ 曾丹² 李晋¹ 邓贵文¹

(1. 电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731; 2. 四川水利职业技术学院 成都 611244)

摘要:合成孔径雷达(SAR)成像的一个关键在于合成孔径时间内雷达天线的位置数据以达到高分辨率成像。载平台的运动轨迹通常不是理想的直线或稳定的,因此在合成过程中,任何微小的运动误差都会导致图像模糊或者失真。对于小范围的成像场景,传统采用全球定位系统(GPS)和信息网络系统(INS)数据联合的运动补偿方法,由于GPS容易受到信号干扰、多径效应的影响,运动补偿的效果总是不太理想。基于此场景问题提出了一种仅利用惯导信息的太赫兹SAR成像运动补偿方法,充分使用惯导系统提供的速度信息,通过对载平台的运动轨迹进行建模,有效地估计了雷达视线方向的回波相位误差,从而实现对太赫兹SAR成像目标的聚焦。实验采用0.2 THz中心频率的SAR系统进行运动补偿,对补偿前后SAR的图像强散射点进行分析,相较于现有技术基于GPS和INS联合的运动补偿方法,运动补偿方法在PSLR和ISLR上分别提升了0.7和0.8 dB,在成像速度上,运动补偿方法也提升了0.2%,实验结果表明,对于小范围成像场景该方法的聚焦效果更好,进一步验证所提到运动补偿算法的正确性和有效性。

关键词:合成孔径雷达;运动补偿算法;太赫兹成像;航向速度误差

中图分类号: TN951; TN957.51

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.5015

Research on terahertz SAR imaging motion compensation method using inertial navigation information

Wu Wenbin¹ Zeng Dan² Li Jin¹ Deng Guiwen¹

(1. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611244, China)

Abstract: A key factor in high-resolution synthetic aperture radar imaging is that the radar operates under ideal conditions. However, the motion trajectory of radar is usually not an ideal straight line or stable, so any small motion error within the synthetic aperture time can cause image blur or distortion. For small-scale imaging scenes, due to the susceptibility of GPS to signal interference and multipath effects, the traditional motion compensation method that combines GPS and INS data is not very effective. In this scenario, this study proposes a terahertz SAR imaging motion compensation method that only utilizes inertial navigation information. This method fully utilizes the velocity information provided by the inertial navigation system, establishes a radar motion trajectory model, and effectively estimates the echo phase error in the radar line of sight direction, thereby achieving focusing on terahertz SAR imaging targets. The experiment used a SAR system with a center frequency of 0.2 THz for motion compensation, and analyzed the strong scattering points of SAR images before and after compensation. Compared with the existing technology based on GPS and INS joint motion compensation methods, the motion compensation method proposed in this study respectively improved by 0.7 and 0.8 dB on PSLR and ISLR. In terms of imaging speed, the motion compensation method proposed in this study also improved by 0.2%. The experimental results showed that the focusing effect of this method was better for small-scale imaging scenes, further verifying the correctness and effectiveness of the motion compensation algorithm mentioned in this study.

Keywords: synthetic aperture radar; motion compensation algorithm; terahertz imaging; heading speed error

0 引言

机载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)^[1]成像是一种利用飞机搭载的 SAR 系统,通过雷达波的传输和接收,来捕获地表或目标的详细信息,并能够在各种天气条件和昼夜时间下进行高分辨率地面或海面的监视和成像。然而,在飞行器运动过程中,由于飞机受到气流和飞机本身的不稳定性等各种影响,飞机的飞行速度和雷达平台的姿态发生变化,从而使飞机的实际轨迹与理想轨迹有所差别。更重要的是,对于高分辨率毫米波 SAR 系统,成像性能对包络和相位误差尤为敏感^[2],因此需要精确的运动补偿来提高成像质量。

目前运动补偿主要分为两部分,基于回波数据的精细补偿和基于运动传感器的粗补偿。前者是从雷达的回波数据估计运动误差^[3-4],后者主要是补偿因载平台剧烈运动而导致的较大的相位误差,通常作为估计运动误差的首要依据。传统的粗补偿技术常采用由全球定位系统(GPS)和信息网络系统(INS)联合的运动补偿方法^[5-6],该方法通过 GPS 提供的位置信息和 INS 提供的姿态信息联合补偿运动误差^[7]。但对于小范围成像场景,由于 GPS 卫星定位容易受到信号遮挡、多径效应等影响^[8],运动补偿后的 SAR 成像聚焦效果不好。

近年来,基于运动传感器的运动补偿算法迅速发展,并取得了良好的补偿效果。张羽等^[9]提出了一种用集中卡尔曼滤波技术对多个传感器数据进行融合,能够得到更高的定位精度,然后在成像算法补偿实际位置域假定理想位置之间的偏差。Chen 等^[10]设计了一种具有双滤波器校正的 INS/GPS 架构,能够在较长的图像采集周期内获得准确的绝对速度和位置测量信息。曲毅等^[11]提出了用 GPS 数据辅助的 SAR 成像运动补偿方法,该方法采用非均匀傅里叶变换校正航迹前向速度误差,从而正确补偿三维方向的运动误差。Ahmad 等^[12]提出了一种在数据采集过程中实时补偿运动传感器的方法,该方法通过使用 Madgwick 滤波器^[13]进行数据融合,结合梯度下降算法完成运动误差的最优估计,具有显著的性能。以上的研究通过滤波或补偿的方式来降低雷达平台位置信息的定位误差,从而提高了 SAR 成像运动补偿精度,虽然取得了一定的进展,但是对于小范围成像场景,采用雷达平台位置信息的补偿方法效果总是不太理想。

基于此场景问题本文提出了一种仅利用惯导信息的运动补偿方法,由于合成孔径角度小,在极短的合成孔径时间内载平台运动幅度不大,而且短时间内 INS 系统精度高、稳定性好,因此可以通过惯导系统提供的速度信息和姿态信息^[14],对雷达平台运动进行建模,进而估计雷达平台的运动误差,该方法能在提高计算效率的同时,又

有效解决了小范围成像场景 GPS 容易受到信号干扰带来聚焦效果不好的问题。本文首先建立机载 SAR 聚束成像模型,其次对航向速度误差进行了详细分析,然后基于惯导数据对雷达实际运动轨迹进行建模并推导出了简化的相位补偿公式,最后对该文的运动补偿方法进行仿真论证。

1 航向速度误差分析

机载聚束 SAR 的成像几何如图 1 所示。其中虚线为雷达理想的运动轨迹,实线表示实际的飞行航迹。以理想航迹的飞机天线相位中心为坐标原点 A , h 为目标高度, θ 为雷达在理想航迹中对目标的照射角,飞机的理想航迹沿着成像坐标系的 X 轴以速度 v_0 做匀速运动。设天线相位中心时刻 t 为 0,飞机的理想坐标即坐标原点 A 为 $(v_0 t, 0, 0)$,成像目标 Target 的坐标为 $(0, y_0, h)$ 。

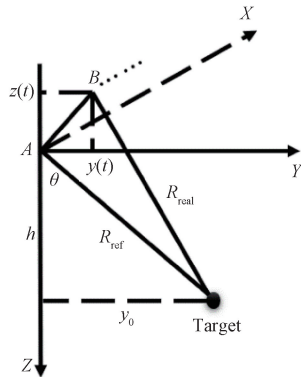


图1 机载聚束 SAR 的成像几何

Fig. 1 Imaging geometry of airborne beam-focused SAR

根据图 1 机载聚束 SAR 成像的几何关系,可得雷达理想航迹下的瞬时斜距 $R_{ref}(t)$ 为:

$$R_{ref}(t_a) = \sqrt{(v_0 t_a)^2 + r_0^2} \quad (1)$$

式中: r_0 表示目标与理想航迹之间的距离。

$$r_0^2 = y_0^2 + h^2 \quad (2)$$

设 SAR 成像系统采用 LFM 波作为发射信号,发射的 LFM 信号可表示为:

$$s(t, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \exp(j2\pi f_c t + j\pi\gamma t^2) \quad (3)$$

式中: f_c 表示载波的中心频率; T_a 为 LFM 的脉冲宽度; γ 为调频斜率; t 和 t_a 分别表示快时间和慢时间。接收端采用正交解调的方式接收目标回波信号^[15]:

$$s_r(\tau, t_a) = \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_{ref}/c}{T_a}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi f_c}{c} R_{ref}\right) \exp\left(j\pi\gamma\left(\tau - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right) \quad (4)$$

式中: c 为光速。应用驻定相位原理和快速傅里叶变换(FFT)^[16], 可得回波信号的二维频谱(省略包络信息):

$$S_r = \exp\left(-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi r_0 f_c}{c} \sqrt{D^2(f_a, v_0) + \frac{2f_r}{f_c} + \frac{f_r^2}{f_c^2}}\right) \quad (5)$$

式中: $D(f_a, v_0)$ 为距离徙动系数。

$$D(f_a, v_0) = \sqrt{1 - \frac{c^2 f_a^2}{4v_0^2 f_c^2}} \quad (6)$$

式(5)的第 1 项为距离调制项, 第 2 项为二维耦合项, 该项与航向速度有关, 作二维耦合项关于 $f_r = 0$ 的泰勒展开并保留至二次项:

$$\begin{aligned} \theta(f_r, f_a, r_0) = & -\frac{4\pi f_c}{c} D(f_a, v_0) r_0 - \frac{4\pi f_r r_0}{c D(f_a, v_0)} + \\ & \frac{4\pi f_c r_0}{2c} \cdot \frac{1 - D^2(f_a, v_0)}{D^3(f_a, v_0)} \cdot \left(\frac{f_r}{f_c}\right)^2 = \\ & \Theta_1(f_a, v_0) + \Theta_2(f_r, f_a, v_0) + \Theta_3(f_r, f_a, v_0) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 第 1 项 $\Theta_1(f_a, v_0)$ 为方位调制项, 该项表明航向速度误差影响着方位向聚焦, 而距离向聚焦则由一次距离调制项 $\Theta_2(f_r, f_a, v_0)$ 、二次距离调制项 $\Theta_3(f_r, f_a, v_0)$ 决定, 它们分别对应式(7)的第 2、3 项。对式(7)的 3 个调制项作关于 $f_a = 0$ 泰勒展开, 并保留至二次项:

$$\Theta_1(f_a, v_0) \approx -\frac{4\pi r_0 f_c}{c} + \frac{\pi c r_0 f_a^2}{2v_0^2 f_c^2} \quad (8)$$

$$\Theta_2(f_r, f_a, v_0) = -\frac{4\pi r_0 f_r}{c} - \frac{\pi c r_0 f_a^2 f_r}{2v_0^2 f_c^2} \quad (9)$$

$$\Theta_3(f_r, f_a, v_0) \approx \frac{\pi c r_0 f_a^2 f_r^2}{2v_0^2 f_c^3} \quad (10)$$

设航向速度误差 Δv 引起的方位调制项误差 $\Delta\Theta_1(f_a, v_0)$ 、一次距离调制项误差 $\Delta\Theta_2(f_r, f_a, v_0)$ 和二次距离调制项误差 $\Delta\Theta_3(f_r, f_a, v_0)$ 为:

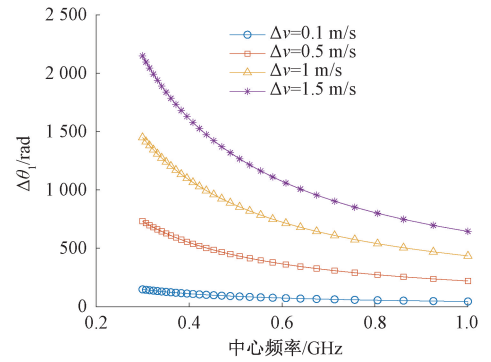
$$\Delta\Theta_1(f_a, v_0) = |\Theta_1(f_a, v_0 + \Delta v) - \Theta_1(f_a, v_0)| \quad (11)$$

$$\Delta\Theta_2(f_r, f_a, v_0) = |\Theta_2(f_r, f_a, v_0 + \Delta v) - \Theta_2(f_r, f_a, v_0)| \quad (12)$$

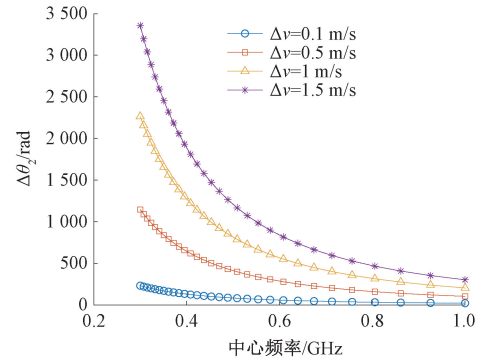
$$\Delta\Theta_3(f_r, f_a, v_0) = |\Theta_3(f_r, f_a, v_0 + \Delta v) - \Theta_3(f_r, f_a, v_0)| \quad (13)$$

为了进一步探究载波工作频率对航向速度误差引起的相位误差的影响, 进行仿真实验。在 $r_0 = 3 \text{ km}$, $v_0 = 62 \text{ m/s}$, 距离向和方位向分辨率 $\rho_r = \rho_a = 0.16 \text{ m}$, 航向速度误差分别为 $\Delta v = 0.1, 0.5, 1, 1.5 \text{ m/s}$ 的条件下, 模拟航向速度误差对方位调制相位误差、一次距离调制相位误差、二次距离调制相位误差的影响如图 2 所示。

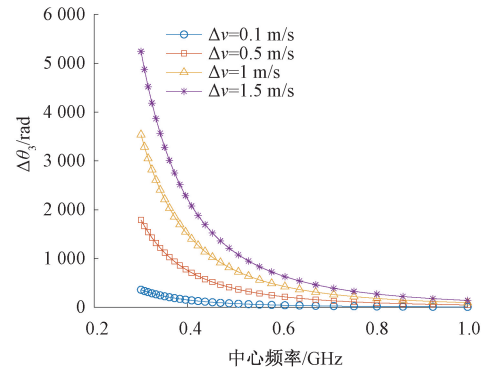
从图 2 可以发现, 航向速度误差与方位调制相位误差、一次距离调制相位误差和二次距离调制相位误差成正比, 航向速度误差越大, 对目标的方位向和距离向聚焦



(a) 方位调制项误差
(a) Azimuth modulation term error



(b) 一次距离调制项误差
(b) Error of the primary distance modulation term



(c) 二次距离调制项误差
(c) Error of the quadratic range modulation term

图 2 相位误差随频率变化曲线

Fig. 2 Frequency curve of phase error

质量影响越大。另一方面, 在相同的航向速度误差下, 载波的中心频率与方位调制相位误差、一次距离调制相位误差和二次距离调制相位误差成反比。在太赫兹频段下, 当方位向和距离向相位误差值小于容忍值时, 相位误差的影响可忽略不计^[17]。特别地, 本文基于惯导信息的太赫兹 SAR 的运动补偿, 在 $f_c = 0.2 \text{ THz}$, $\Delta v = 0.1 \text{ m/s}$ 条件下, 方位调制相位误差为 10^{-1} rad 、一次距离调制相位误差为 10^{-4} rad 和二次距离调制相位误差为 10^{-6} rad 。相位误差值小于预设容忍值(如 $\pi/4$ 或 $\pi/2$), 故在太赫兹频段的运动补偿中, 对航向速度误差的影响可忽略不计。

2 机载 SAR 成像运动补偿分析

由第1节可知,在太赫兹频段下可忽略航向速度误差,则飞机的实际坐标假设为 $B(v_0 t, \Delta y, \Delta z)$, Δy 和 Δz 表示雷达运动偏差在 Y 轴和 Z 轴的投影。由于合成孔径角度小,在合成孔径时间内,雷达平台的运动幅度不大,因此可以假设在每一个脉冲重复周期内雷达做匀加速直线运动,则雷达在每一个方位向运动偏差可表示为:

$$\begin{cases} \Delta y = v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2 \\ \Delta z = v_z t + \frac{1}{2} a_z t^2 \end{cases} \quad (14)$$

雷达在理想航迹下接收到的回波信号的相位为:

$$\phi_{ref} = -\frac{4\pi}{\lambda} R_{ref}(t) \quad (15)$$

作关于 $t = 0$ 的泰勒级数展开,并保留至二次项:

$$R_{ref}(t) \approx r_0 + \frac{v_0^2 t^2}{2r_0} \quad (16)$$

雷达在实际航迹接收到的回波信号的相位为:

$$\phi_{real} = -\frac{4\pi}{\lambda} R_{real}(t) \quad (17)$$

式中: $R_{real}(t)$ 为实际航迹下雷达与成像目标的距离。

$$R_{real}(t) = \sqrt{(v_0 t)^2 + (\Delta y - y_0)^2 + (\Delta z - h)^2} \quad (18)$$

为了简化分析,定义了另一座标系,即视线座标系 (D_x, D_{los}, D_τ) , 其中, D_{los} 轴为雷达视线方向, D_x 轴仍为参考航迹方向, D_τ 轴垂直于视线方向。两座标系之间的关系为:

$$\begin{cases} D_x(t) = v_0 t \\ D_{los}(t) = \Delta y \sin \theta + \Delta y \cos \theta \\ D_\tau(t) = \Delta z \sin \theta + \Delta z \cos \theta \end{cases} \quad (19)$$

则在视线坐标系中实际坐标与成像目标之间的距离为:

$$R_{real}(t) = \sqrt{(r_0 - D_{los}(t))^2 + v_0^2 t^2 + D_\tau(t)^2} \quad (20)$$

作关于 $t = 0$ 的泰勒级数展开,并保留至二次项:

$$\begin{aligned} R_{real}(t) \approx & R_{real}(0) + R'_{real}(0)(t-0) + \frac{1}{2} R''_{real}(0)(t-0)^2 \approx \\ & (r_0 - D_{los}(0))a + \left(\frac{\varepsilon D'_\tau(0)}{a} - \frac{D'_{los}(0)}{a} \right)t + \\ & \left(\frac{\varepsilon D''_\tau(0)}{2a} - \frac{D''_{los}(0)}{2a} + \frac{v_0^2 t^2}{2(r_0 - D_{los}(0))a} \right)t^2 + \\ & \left(\frac{(\varepsilon D'_{los}(0) + D'_\tau(0))^2}{2a^3 D_\tau(0)} \right)t^2 \end{aligned} \quad (21)$$

其中:

$$\varepsilon = \frac{D_\tau(0)}{r_0 - D_{los}(0)} \quad (22)$$

$$a = \sqrt{1 + \varepsilon^2} \quad (23)$$

由于 $r_0 - D_{los}(0) \gg D_\tau(0)$, 所以在忽略 ε 的影响并保留至二次项,式(21)可重写为:

$$\begin{aligned} R_{real}(t) \approx & r_0 + D_{los}(t) + \frac{v_0^2 t^2}{2(r_0 - D_{los}(t))} = \\ & r_0 + D_{los}(t) + \frac{v^2 t^2 (r_0 + D_{los}(t))}{2(r_0^2 - D_{los}^2(t))} \end{aligned} \quad (24)$$

由于 $r_0^2 \gg D_{los}^2(t)$, 在忽略 $D_{los}^2(t)$ 的影响时,式(24)可重写为:

$$R_{real}(t) \approx r_0 + D_{los}(t) + \frac{v^2 t^2}{2r_0} + \frac{v^2 t^2 D_{los}(t)}{2r_0^2} \quad (25)$$

进而可得雷达实际回波相位 ϕ_{real} 为:

$$\phi_{real} = -\frac{4\pi}{\lambda} \left(r_0 + \frac{v^2 t^2}{2r_0} \right) - \frac{4\pi}{\lambda} \left(D_{los}(t) + \frac{v^2 t^2 D_{los}(t)}{2r_0^2} \right) \quad (26)$$

联立式(17)和式(26)可得补偿相位 $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \left(D_{los}(t) + \frac{v^2 t^2 D_{los}(t)}{2r_0^2} \right) \quad (27)$$

其中,补偿相位 $\Delta\phi$ 由空不变误差相位 ϕ_{mc} 和空变误差相位 $\partial\phi_{mc}$ 两部分组成:

$$\phi_{mc} = \frac{4\pi}{\lambda} D_{los}(t) \quad (28)$$

$$\partial\phi_{mc} = \frac{2\pi v^2 t^2 D_{los}(t)}{\lambda r_0^2} \quad (29)$$

观察式(28)~(29)可以发现,空不变误差相位 ϕ_{mc} 与雷达方位向位置无关,该项相位补偿比较容易,本文根据惯导信息对雷达运动进行建模,可得出 $D_{los}(t)$ 的具体表达式;而空变误差相位 $\partial\phi_{mc}$ 与雷达处于方位向的某个位置有关,对于不同的方位向位置会造成不同的相位误差^[18],对于该项的补偿常采用基于回波数据的自聚焦算法,后续将通过 PGA^[19-20] (phase gradient autofocus) 自聚焦算法对空变误差相位做进一步补偿。

为了进一步求解某一个方位向的补偿相位,需要将 $D_{los}(t)$ 在每一个方位向离散化。定义 $\Delta D_{los}(i)$ 为第 i 个方位时间内产生的雷达视线误差:

$$\begin{aligned} \Delta D_{los}(i) = & \begin{cases} 0, i = 1 \\ \frac{v_y^s(i) + v_y^e(i)}{2} \times PRT \times \sin \theta + \\ \frac{v_z^s(i) + v_z^e(i)}{2} \times PRT \times \cos \theta, i \in [2, N_{slow}] \end{cases} \end{aligned} \quad (30)$$

式中: $v_y^s(i)$ 和 $v_y^e(i)$ 分别表示第 i 个方位时间内起始时刻和终止时刻成像坐标系下飞机沿 y 轴的速度; $v_z^s(i)$ 和

$v_z^e(i)$ 分别表示表示第 i 个方位时间内起始时刻和终止时刻成像坐标系下飞机沿 z 轴的速度。

则第 k 个方位时刻的雷达视线误差 $D_{los}(k)$ 可表示为:

$$D_{los}(k) = \sum_{i=1}^k \Delta D_{los}(i) \tag{31}$$

因此可以在 SAR 回波信号每一个方位向乘以一个补偿相位 $\phi_{mc}(k)$, 来消除附加相位带来的影响。

$$\phi_{mc}(k) = \frac{4\pi}{\lambda} D_{los}(k) \tag{32}$$

3 实验结果

为验证本文所述的理论,选取陕西省西安市蒲城县的日晷数据集进行 PFA 算法成像。SAR 成像系统参数如表 1 所示。

表 1 SAR 成像系统参数

Table 1 SAR imaging system parameters

飞行速度	60 m/s	脉宽	10 μ s
高度	1 km	脉冲重复频率	20 kHz
工作频率	0.2 THz	擦地角	30°
发射带宽	1.1 GHz	采样率	500 MHz
峰值功率	3 W	幅宽	130 m
作用距离	1.5 km	接收带宽	13 MHz
信噪比	10 dB	波束宽度	2°

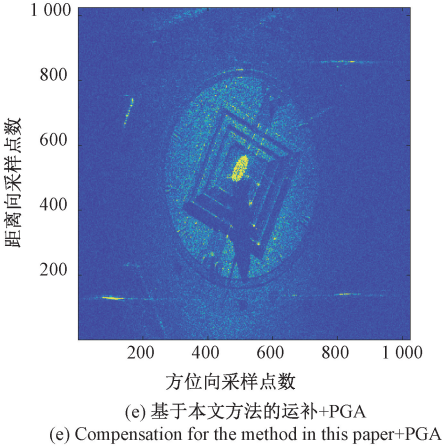
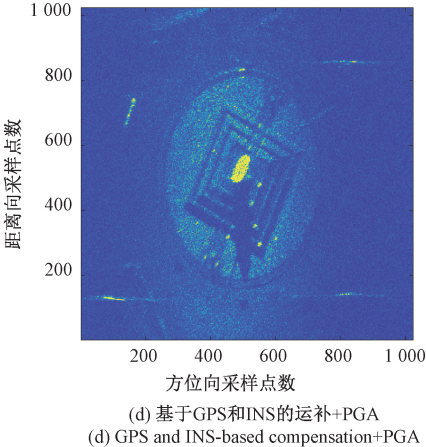
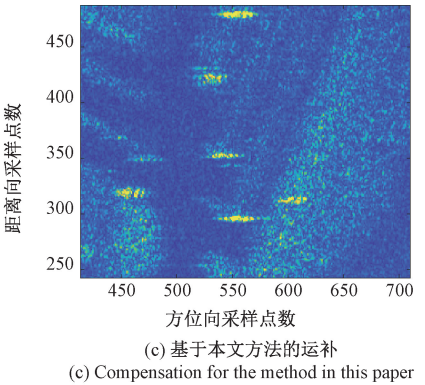
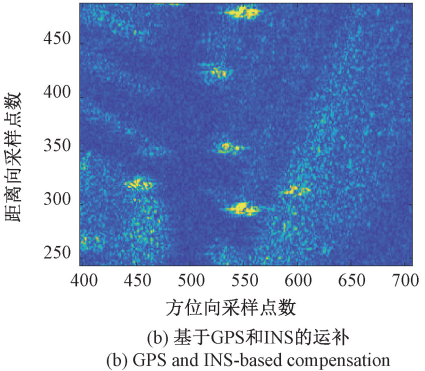
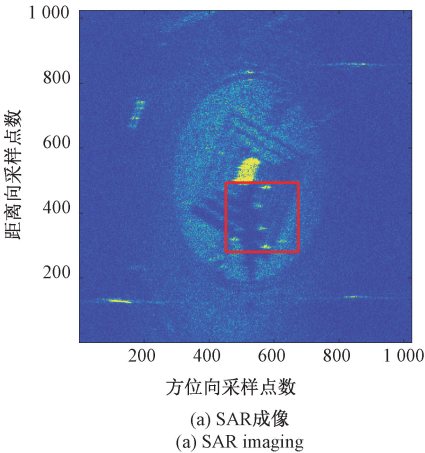


图 3 运动补偿仿真结果

Fig. 3 Motion compensation simulation results

太赫兹成像系统采用正侧视模式,目标方位向和距离向理论分辨率为 $\rho_r = \rho_a = 0.16\text{ m}$,日晷数据的 SAR 成像结果如图 3 所示。

图 3(a)是采用 PFA 算法对目标区域的成像结果,可以发现在没有运动补偿前,成像结果清晰度不高,而且出现严重的点目标散焦。图 3(b)和(c)是对图 3(a)做运动补偿后红色方框选中的细节区域。其中,图 3(b)表示传统基于 GPS 和 INS 联合的惯导补偿方法,图 3(c)表示该文采用的惯导补偿方法。对比图 3(b)和(c)可以发

现,对于小范围成像场景,GPS 容易受到信号干扰,采用 GPS 定位数据的运动补偿方法,补偿相位不够精确,目标区域散焦仍比较严重,成像聚焦效果不太理想,而该文方法通过对雷达运动进行建模,不仅能有效估计雷达真实运动轨迹,而且不需采用 GPS 定位数据,既有效压缩了距离向点目标,又大大简化了运动补偿的复杂度。由于惯导补偿是粗补偿,后续又采用了基于回波数据的 PGA 自聚焦算法对惯导补偿后的图做精细补偿,如图 3(d)和(e)所示,可以发现,采用该文方法的惯导补偿,图像的轮廓更清晰,而且目标区域能够被有效压缩,也进一步验证了该文所述方法的有效性。

通过实测场景数据的仿真分析,已经能够直观感受该文方法的有效性,为了定量分析现有技术方法和该文方法的性能,对图 3(a)方框区域中的强散射点做距离向剖面图如图 4 所示,表 2 为具体的性能指标。

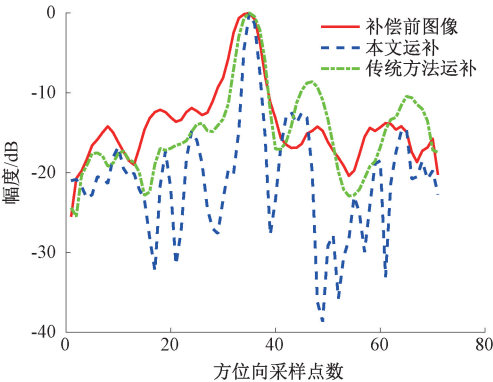


图 4 距离向剖面图

Fig. 4 Distance profile

表 2 强散射点性能分析

Table 2 Performance analysis of strong scattering points

	PSLR/dB	ISLR/dB	成像时间/%
原始图像	-8.344 7	-3.437 2	98.63
本文算法	-12.431 8	-4.662 4	100
基于 GPS 和 INS 的算法	-11.692 4	-3.900 5	100.2

从图 4 和表 2 可以看出,本文的运动补偿方法和传统基于 GPS 和 INS 联合的惯导补偿方法对 SAR 图像都有补偿效果,而本文方法的峰值旁瓣比和积分旁瓣比相对较小,旁瓣抑制明显,能量集中,聚焦效果良好,SAR 图像质量能够得到明显改善。基于 GPS 和 INS 联合的惯导补偿方法,需要将 GPS 数据从经纬高坐标系(LLA)转换到地固坐标系(ECEF),再从 ECEF 坐标系转换到东北天(ENU)坐标系,最后将 ENU 坐标系转换到 SAR 成像坐标系。而该文的运动补偿方法仅涉及 ENU 坐标系到 SAR 成像坐标系的变换,运动补偿的复杂度降低,运算速

度大幅提高,从表 2 可以看出,以本文算法的成像时间为基准,本文算法的成像速度比传统基于 GPS 和 INS 联合的惯导补偿方法快了 0.2%。

4 结 论

SAR 成像中的运动补偿是一个用于修正由于平台运动导致的成像误差,目前将 INS 和 GPS 联合的运动补偿方法被广泛运用,但对于小范围成像场景,GPS 卫星定位容易受到信号遮挡、多径效应等影响,利用 GPS 的位置信息估计平台运动误差的补偿方法效果不太理想。本文对现有的研究进展进行详细的综述和讨论,并围绕 SAR 成像回波信号模型,分析了航向速度误差对方位向和距离向相位误差的影响,针对小范围成像场景,提出一种基于惯导速度信息估计雷达运动误差的补偿方法,本文方法仅提供惯导信息,比传统使用 GPS 位置数据的运动补偿方法补偿效果更好,且成像速度更快。最后在对比实验中,进一步证明本文方法在小范围成像场景下,采用速度建模雷达运动轨迹估计运动误差的方法更具有优势,为未来高精度运动建模和低运算量提供了理论基础。

参考文献

[1] 张武,刘秀清. 基于改进 YOLOv5 的 SAR 图像飞机目标细粒度识别[J]. 国外电子测量技术,2024,43(6): 143-151.

ZHANG W, LIU X Q. Fine-grained recognition of aircraft targets in SAR images based on improved YOLOv5[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024,43(6): 143-151.

[2] 金养昊. 高分辨率 SAR 轨迹非线性问题处理与成像算法研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.

JIN Y H. Research on nonlinear problem processing and imaging algorithm of high-resolution SAR trajectory[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[3] 李易. 基于回波数据的机载双基前视 SAR 运动误差估计与补偿[D]. 成都:电子科技大学, 2023.

LI Y. Motion error estimation and compensation of airborne bistatic forward-looking SAR based on echo data[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

[4] 叶倩嵘. 太赫兹高分辨率成像运动补偿方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.

YE Q R. Research on motion compensation method for terahertz high-resolution imaging [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.

- [5] 蒲巍. 机载双基地前视 SAR 运动补偿方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
PU W. Research on motion compensation method of airborne bistatic forward-looking SAR [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [6] 丁国强,熊明,张铎,等. SINS/GPS 组合导航的机载 SAR 姿态算法[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2016,46(6):674-682.
DING G Q, XIONG M, ZHANG D, et al. Airborne SAR attitude algorithm for SINS/GPS integrated navigation[J]. Journal of Henan University (Natural Science Edition), 2016,46(6):674-682.
- [7] 张文勤,周文清,邵毅. 基于双天线 GNSS/SINS 组合的风速测量运动补偿方案设计[J]. 电子测量技术, 2022,45(19):1-6.
ZHANG W Q, ZHOU W Q, SHAO Y. Design of motion compensation scheme for wind speed measurement based on dual-antenna GNSS/SINS combination[J]. Electronic Measurement Technology, 2022,45(19):1-6.
- [8] 黎标幸,夏海英,宋树祥,等. GPS/BDS 组合的 RTK 多路径抑制方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7):199-205.
LI B X, XIA H Y, SONG SH X, et al. RTK multipath suppression method for GPS/BDS combination [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(7):199-205.
- [9] 张羽,李更祥,张鹏飞,等. 基于多传感器数据融合的合成孔径声纳运动补偿算法[J]. 北京邮电大学学报, 2017,40(5):82-86.
ZHANG Y, LI G X, ZHANG P F, et al. Motion compensation algorithm for synthetic aperture sonar based on multi-sensor data fusion [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(5):82-86.
- [10] CHEN L, LIU Z, FANG J. An accurate motion compensation for SAR imagery based on INS/GPS with dual-filter correction [J]. Journal of Navigation, 2019, 72(6):1399-1416.
- [11] 曲毅,陈毓蕴. GPS 辅助的 FMCWSAR 成像运动补偿[J]. 科学技术与工程, 2016,16(17):215-220.
QU Y, CHEN L Y. GPS-assisted motion compensation for FMCWSAR imaging [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(17):215-220.
- [12] AHMAD A Z, LIM S T, KOO C V, et al. A high efficiency gyrostabilizer antenna platform for real-time UAV synthetic aperture radar (SAR) motion error compensation [J]. Applied Mechanics and Materials, 2019,4752:16-22.
- [13] HASAN A M, RAHMAN H M. Smart phone based sensor fusion by using madwick filter for 3D indoor navigation[J]. Wireless Personal Communications, 2020, 113(4):1-19.
- [14] 李倩,蒋正华,孙炎,等. 基于因子图的 INS/UWB 室内行人紧组合定位技术[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):32-45.
LI Q, JIANG ZH H, SUN Y, et al. INS/UWB indoor pedestrian tight combined positioning technology based on factor diagram [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(5):32-45.
- [15] 刘彦斌. 星载 SAR 实时成像处理算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
LIU Y B. Research on spaceborne SAR real-time imaging processing algorithm[D]. Xi'an:Xidian University, 2022.
- [16] 张良,程婷,张欣. 色噪声背景下的自适应恒模波形设计[J]. 电子信息对抗技术, 2017, 32(2):19-23.
ZHANG L, CHENG T, ZHANG X. Design of adaptive constant-mode waveform in the background of color noise [J]. Electronic Information Countermeasure Technology, 2017, 32(2):19-23.
- [17] HAO Z, SUN J, GU D. A novel motion compensation method for high resolution terahertz SAR imaging[C]. 2022 15th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), 2022.
- [18] 陆钱融,王希冀,马宪超,等. 基于空变运动补偿的斜视 SAR 成像技术[J]. 制导与引信, 2022, 43(3):18-42.
LU Q R, WANG X J, MA X CH, et al. Strabismus SAR imaging technique based on spatial change motion compensation [J]. Guidance & Fuze, 2022, 43(3):18-42.
- [19] 郭江哲,朱岱寅,毛新华. 一种 SAR 两维自聚焦算法的 FPGA 实现[J]. 雷达学报, 2016, 5(4):444-452.
GUO J ZH, ZHU D Y, MAO X H. FPGA implementation of a SAR two-dimensional autofocusing algorithm [J]. Journal of Radars, 2016, 5(4):444-452.
- [20] 邓玉辉,孙光才. 一种新的高分辨 SAR 自聚焦方法[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(S1):73-77.
DENG Y H, SUN G C. A new high-resolution SAR autofocusing method [J]. Shanghai Aerospace, 2021,

38 (S1): 73-77.

作者简介



吴文彬, 2023 年于河北大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹高分辨率合成孔径雷达成像。

E-mail: uestcwbb@163.com

Wu Wenbin received his B. Sc. degree from HeBei University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include Terahertz high-resolution synthetic aperture radar imaging.



曾丹, 2007 年于四川师范大学获得学士学位, 现为四川水利职业技术学院讲师, 主要研究方向为水利水电专业继续教育、水利水文数据探测等方向。

E-mail: 308571550@qq.com

Zeng Dan received her B. Sc. degree from Sichuan Normal University in 2007. Now she is a lecturer at Sichuan Water Conservancy Vocational and Technical College. Her main research interests include continuing education in water conservancy and hydropower, and detection of water conservancy and hydrological data.



李晋 (通信作者), 2003 年于浙江大学获得学士学位, 2006 年于电子科技大学获得硕士学位, 2010 年于电子科技大学获得博士学位, 现为电子科技大学研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达技术、雷达系统理论、雷达信号处理等。

E-mail: lijn@uestc.edu.cn

Li Jin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 2003, M. Sc. degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 2006, Ph. D. degree from the University of Electronic Science and Technology of China in 2010. Now he is a professor at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include Terahertz radar technology, radar system theory, radar signal processing.



邓贵文, 2023 年于吉林大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为雷达通信一体化。

E-mail: 992991763@qq.com

Deng Guiwen received his B. Sc. degree from JiLin University in 2023. Now he is a M. Sc. candidate at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include Integration of radar and communication.