

多旋翼无人机载SAR的视线运动误差修正与补偿

李悦丽* 李泽森* 王建 刘可 周智敏

(国防科技大学电子科学学院 长沙 410073)

摘要: 多旋翼无人机体积小、重量轻、成本低,但由于飞行航迹极不稳定,成像信号处理难度很大。基于惯导数据实时调整脉冲重复频率(PRF)可预先补偿航向位移误差,但是,其残余误差在高波段合成孔径雷达(SAR)斜视成像时不能忽略。为此,利用位移实测值与理想值间的差异提取残余航向位移误差,修正了斜视成像几何下的视线运动误差,改进了传统的1阶、2阶视线误差补偿因子,并基于成对回波理论分析了旋翼无人机正弦位移误差的幅度和频率容限。仿真和实测数据验证了所提方法在大斜视成像时可减小视线运动误差约一个数量级,显著提高多旋翼无人机载SAR成像的性能。

关键词: 合成孔径雷达; 运动补偿; 航向位移误差; 视线运动误差; 多旋翼无人机

中图分类号: TN958.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2022)06-1061-20

DOI: 10.12000/JR22082

引用格式: 李悦丽, 李泽森, 王建, 等. 多旋翼无人机载SAR的视线运动误差修正与补偿[J]. 雷达学报, 2022, 11(6): 1061–1080. doi: 10.12000/JR22082.

Reference format: LI Yueli, LI Zesen, WANG Jian, *et al.* Modification and compensation of the line-of-sight motion error for multirotor UAV SAR[J]. *Journal of Radars*, 2022, 11(6): 1061–1080. doi: 10.12000/JR22082.

Modification and Compensation of the Line-of-Sight Motion Error for Multirotor UAV SAR

LI Yueli* LI Zesen* WANG Jian LIU Ke ZHOU Zhimin

(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The multirotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) has the advantages of small size, light weight, and low cost. However, imaging signal processing is complicated due to the extremely unstable flight path. Real-time adjustment of pulse repetition frequency based on inertial navigation data can compensate for the along-track displacement error in advance, but the residual error cannot be ignored for highly squinted high-band Synthetic Aperture Radar (SAR). Therefore, the residual along-track displacement error is extracted based on the difference between the measured displacement value and the ideal one, and then the Line-of-Sight (LOS) motion error of the squint imaging geometry is modified. The traditional first-order and second-order LOS error compensation factors are improved, and the tolerance of the amplitude and frequency of the sinusoidal displacement error of a multirotor UAV is analyzed based on paired echo theory. Simulation and flight experiments verify that the proposed method can reduce the LOS motion error by an order of magnitude in large squint imaging and significantly improve the imaging performance of the squinted SAR of a multirotor UAV.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); MOtion COmpensation (MOCO); Along-track displacement error; Line-of-Sight (LOS) motion error; Multirotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

收稿日期: 2022-05-06; 改回日期: 2022-09-06; 网络出版: 2022-09-21

*通信作者: 李悦丽 liyueli4uwb@nudt.edu.cn; 李泽森 744007849@qq.com

*Corresponding Authors: LI Yueli, liyueli4uwb@nudt.edu.cn; LI Zesen, 744007849@qq.com

基金项目: 国家部委基金(61404150103, 50913030103)

Foundation Items: The National Ministries Foundation (61404150103, 50913030103)

责任主编: 邢孟道 Corresponding Editor: XING Mengdao

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)具有远距离、全天候、全天候获取地面高分辨图像的能力,星载、机载高分辨SAR已广泛用于军事和民用遥感领域。近年来,适合搭载多旋翼无人机平台的微型SAR系统不断涌现,这类系统成本低、机动能力强、易于操控,受到国内外研究人员的高度重视。为降低成本、减小功耗,旋翼无人机上搭载的微型SAR系统多选择毫米波波段,采用调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)信号体制,带宽大,能够获得超高分辨率图像^[1-3]。

通常,无人机所配备的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)/全球定位系统(Globe Positioning System, GPS)精度和数据率低,直接采用测量参数运动补偿的精度受限,为此,研究人员深入研究了基于数据的运动补偿算法^[4]。基于数据的运动补偿可分为参数化方法和非参数化方法。参数化方法通过建立多项式相位模型从原始数据中估计运动误差,典型算法包括对比度最优自聚焦算法^[5]和图像偏移(Map Drift, MD)算法^[6,7],文献^[8]提出了一种基于原始数据的无人机载SAR运动补偿方法,通过划分子孔径估计多普勒调频率,并基于固定翼无人机航向位移误差的低阶特性分离了3方向运动误差,大幅提高了无人机载SAR的成像质量。但该类算法需划分子孔径,适于低阶相位误差的补偿,难以估计高阶相位误差。非参数化方法基于图像中的特显点重建相位误差,能够补偿高阶相位误差,典型的有相位梯度自聚焦算法(Phase Gradient Autofocus, PGA)^[9-11]和最小熵自聚焦算法^[12,13],如文献^[10]提出了一种适于斜视SAR成像的波数域自聚焦算法,但这类方法的性能依赖于特显点的质量,对图像的信杂比要求较高。在旋翼无人机运动补偿领域,研究人员重点研究了旋翼无人机视线(Line of Sight, LOS)运动误差估计和补偿算法^[13-22]。文献^[13,17]研究了基于图像最小熵准则的残余距离徙动补偿算法,利用共轭梯度算法估计强散射目标区域的残余位移误差,减小距离空变误差的影响。文献^[18]提出了一种基于回波数据的局部二阶MD(Local Quadratic MD, LQMD)算法,通过划分子孔径估计相位误差的二阶项得到视线方向加速度,再进行二次积分提取目标的残余距离徙动。文献^[19]提出了基于先验知识的两维相位梯度自聚焦法,通过多次迭代实现跨距离单元残余距离徙动的补偿。同样,基于回波数据划分子孔径估计跨距离单元徙动,要求子孔径长度划分能适应误差的变化,基于

图像数据估计特显点相位误差则要求较好的初始图像聚焦性能。

相比固定翼无人机,多旋翼无人机体积更小,飞行速度更慢,轨迹和姿态受气流扰动影响大,而且旋翼的转动导致运动误差阶数高,需要结合运动测量参数提高运动补偿效率和精度^[14,23]。在基于测量参数的航向位移误差补偿方面,近年来,文献^[24,25]研究了毫米波SAR实时成像对IMU测量精度的要求,指出高分辨成像要求IMU对轨迹测量精度应达到波长的10%,而常规惯导仅能达到厘米级的测量精度。文献^[26]则提出了一种上采样粒子滤波器,融合IMU/GPS数据后提高数据率以改善方位向重采样的性能。文献^[27]提出了一种基于惯导的机载斜视SAR成像运动补偿方法,将惯导速度矢量投影到理想航向上估计运动误差并完成航向位移误差补偿,但需要将数据沿方位向划分重叠子块以避免相位突变。无人机载SAR的运动补偿中,通过脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)调整补偿航向误差是一种简易可行的运补策略^[23,28-30]:首先采用实时PRF调整消除航向位移误差,再进行与航向正交位移误差的补偿,可实现航向误差和视线向误差的解耦,降低运补的难度。但是,长期以来,大多数研究默认实时PRF调整后航向误差已被补偿或影响不大,对残余航向位移误差未见深入研究和探讨。

事实上,随着雷达频段升高和旋翼无人机运动误差的频率升高,残余航向位移误差如不进行预先补偿,对图像的聚焦会产生很大影响,且难以在后续基于回波数据的运动补偿算法中去除。针对这一问题,本文首先推导了斜视成像几何下瞬时斜距与各方向位移误差的关系,指出采用实时PRF调整后残余航向位移误差会引入视线运动误差;接着,修正了视线运动误差的表达式,并改进了距离空变和空不变视线运动误差补偿因子,以实现对各种视角条件下视线运动误差的准确补偿;随后,基于旋翼无人机的实测运动参数分析了误差特性,给出了残余位移误差的提取方法,理论推导了算法对正弦位移误差幅度和频率的容限。最后通过仿真和实测数据验证了本文方法提升斜视SAR成像性能的有效性。

2 斜视成像几何的视线运动误差

非匀速直线运动的斜视SAR成像几何关系如图1所示。坐标轴XYZ确立了成像的直角坐标系,其中O点为坐标系的原点,H为载机飞行高度。假设雷达平台沿与X轴平行的航迹以速度 v 匀速飞行,并发射线性调频连续波信号,天线右视。对于测绘带内波束中心点目标 S_0 (坐标 $[R_0 \sin \theta_0, -y_n, 0]$),

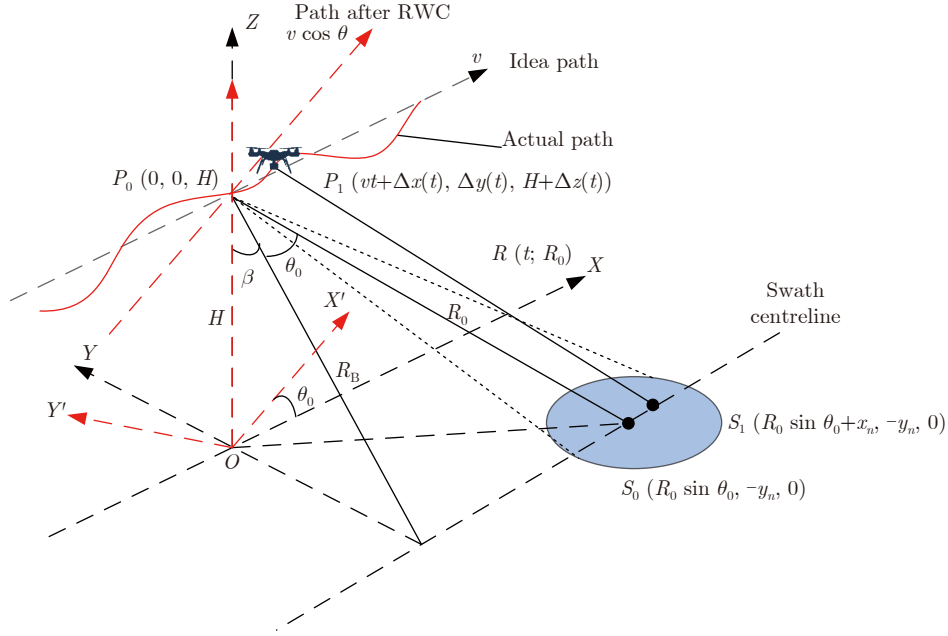


图1 存在运动误差时雷达斜视成像的几何关系图

Fig. 1 Geometry for highly squinted SAR imaging with motion error

R_0 为零时刻目标与天线相位中心(Antenna Phase Center, APC) P_0 的瞬时斜距, $R_B = R_0 \cos \theta_0 = \sqrt{y_n^2 + H^2}$ 为航线与 S_0 之间的最近斜距(零多普勒斜距), $y_n = R_B \sin \beta$, θ_0 为雷达斜视角, β 为 R_B 与 Z 方向的夹角。

假设平台在 t 时刻位于 P_1 点, 相对理想飞行轨迹, 沿 3 方向的运动误差分别为 $\Delta x(t)$, $\Delta y(t)$ 和 $\Delta z(t)$, P_1 (坐标 $[vt + \Delta x(t), \Delta y(t), H + \Delta z(t)]$)与 S_0 附近另一点目标 S_1 (坐标 $[R_0 \sin \theta_0 + x_n, -y_n, 0]$)的瞬时斜距为

$$\begin{aligned}
 R(t; R_0) &= \sqrt{(vt + \Delta x(t) - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + (\Delta y(t) + y_n)^2 + (\Delta z(t) + H)^2} \\
 &\approx \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} + \frac{\Delta y(t) y_n + \Delta z(t) H + \Delta x(t) (vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}} \\
 &\approx \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} + \frac{\Delta y(t) R_B \sin \beta + \Delta z(t) R_B \cos \beta + \Delta x(t) (vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}} \\
 &= \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} + \frac{R_B (\Delta y(t) \sin \beta + \Delta z(t) \cos \beta)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}} + \frac{\Delta x(t) (vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中, 第2项 $R_B / \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} = \cos \theta$, θ 为APC相对目标 S_1 的瞬时斜视角, 第3项表明残余航向位移误差会造成目标视线位移误差, 若忽略误差中随速度和目标位置变化的分量, 令 $vt - x_n = 0$, 则有

$$\begin{aligned}
 R(t; R_0) &\approx \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} + (\Delta y(t) \sin \beta + \Delta z(t) \cos \beta) \cos \theta - \Delta x(t) \sin \theta_0 \\
 &= \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} + \Delta r_{\text{los}}(t, R_B; \theta)
 \end{aligned} \tag{2}$$

近似处理引入的剩余误差为

$$\Delta x_r = \frac{\Delta x(t) (vt - x_n)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}} \approx \frac{\Delta x(t) (vt - x_n)}{R_0} \tag{3}$$

高波段SAR积累角较小, 可认为式(2)中 $\cos \theta \approx \cos \theta_0$, 即在主波束覆盖范围内目标与APC连线上的运动误差均等于沿天线视线方向的运动误差 $\Delta r_{\text{los}}(t, R_B; \theta_0)$, 并将其展开为脉间和脉内运动误差的组合:

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{los}}(t, R_B; \theta_0) = & \Delta y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 + \Delta z(t_m) \\ & \cdot \cos \beta \cos \theta_0 - \Delta x(t_m) \sin \theta_0 \\ & + (v_y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 + v_z(t_m) \\ & \cdot \cos \beta \cos \theta_0 - \Delta v_x(t_m) \sin \theta_0) \hat{t} \\ = & \Delta r_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0) + v_{\text{los}}(t_m; \theta_0) \hat{t} \quad (4) \end{aligned}$$

其中, t_m 为慢时间, \hat{t} 为快时间, $\Delta r_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0)$ 为脉间视线运动误差, $v_{\text{los}}(t_m; \theta_0) \hat{t}$ 为脉内视线运动误差, $\Delta v_x(t_m)$ 表示航向速度误差, $v_y(t_m)$ 和 $v_z(t_m)$ 分别表示与航向正交方向的慢时间速度。式(4)说明除侧向和天向位移外, 航向位移误差也会引入视线运动误差。当雷达正侧视成像时, 由于斜视角近似为0, 有 $\sin \theta_0 \approx 0$, 航向速度误差对视线方向的影响可以忽略, 式(4)简化为

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{los}}(t, R_B; 0) = & \Delta y(t_m) \sin \beta + \Delta z(t_m) \cos \beta \\ & + (v_y(t_m) \sin \beta + v_z(t_m) \cos \beta) \hat{t} \quad (5) \end{aligned}$$

式(5)即为正侧视成像几何中的视线运动误差, 其大小与侧向和天向位移误差、速度以及波束俯仰角有关。但是, 当雷达斜视成像时, 不能采用式(5)进行视线运动误差补偿, 在以往的研究中, 为了降低运补难度, 通常将式(4)中的航向位移误差和视线位移误差分两步补偿, 首先通过方位向重采样^[20]或系统的实时PRF调整^[30]实现沿航向的均匀采样, 然后假设 $\Delta x(t) \approx 0$, 式(4)变为^[15,23]

$$\begin{aligned} \Delta r_{\text{los-PRF}}(t, R_B; \theta_0) \approx & \Delta y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 \\ & + \Delta z(t_m) \cos \beta \cos \theta_0 \\ & + (v_y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 \\ & + v_z(t_m) \cos \beta \cos \theta_0) \hat{t} \quad (6) \end{aligned}$$

后续只考虑侧向和天向位移误差对视线运动误差的影响。采用方位向重采样补偿航向位移误差的精度最高, 但运算量较大, 精度受到数据率的影响, 因此微型SAR系统成像更适合采用实时PRF调整, 问题是PRF调整后是否满足 $\Delta x(t) \approx 0$? 根据文献^[30], 在雷达进行实时PRF调整时, 应先设置参考航迹角、参考航向速度和参考PRF, 然后根据真实速度与参考速度的比值调整雷达的PRF。其实质是通过调整脉冲发射时间适应航向速度的变化, 以实现对方位空间的均匀采样。PRF实时调整存在残余航向位移误差的原因在于: (1)惯导的数据更新率低于PRF, PRF调整时使用的惯导速度并非当前时刻的平台速度, 这一相对滞后会引入航向位移误差; (2)雷达系统进行PRF调整的精度受到系统参考时钟间隔的限制, 无法保证能够将误差完全消除。假设残余航向位移误差为 $\Delta x'(t)$, 若满足 $\Delta x'(t) \ll \rho_R$

且 $\Delta x'(t) \ll \lambda$, 则残余误差影响可以忽略; 若满足 $\Delta x'(t) \ll \rho_R$ 不满足 $\Delta x'(t) \ll \lambda$, 则包络误差可以忽略, 但所引入的相位误差会造成图像散焦, 在实时PRF调整后的残余航向位移误差往往属于后者, 这一误差对波长厘米级甚至毫米级的SAR系统影响大。因此, 在旋翼无人机载SAR成像时不应直接假设PRF调整后 $\Delta x(t) = 0$, 而应考虑残余航向位移误差 $\Delta x'(t)$ 的影响。实时PRF调整后, 假设雷达沿航向匀速运动, 则残余航向位移误差 $\Delta x'(t_m) = x(t_m) - \bar{v}_x t_m$, 其中 \bar{v}_x 为补偿的参考速度, 在式(4)基础上对斜视成像几何中的视线运动误差进行修正, 得到:

$$\begin{aligned} \Delta r'_{\text{los}}(t, R_B; \theta_0) = & \Delta y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 + \Delta z(t_m) \\ & \cdot \cos \beta \cos \theta_0 - \Delta x'(t_m) \sin \theta_0 \\ & + (v_y(t_m) \sin \beta \cos \theta_0 + v_z(t_m) \\ & \cdot \cos \beta \cos \theta_0) \hat{t} \\ = & \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0) + v_{\text{los}}(t_m; \theta_0) \hat{t} \quad (7) \end{aligned}$$

其中, $\Delta x'(t_m)$ 对视线运动误差的影响与斜视角的正弦值成正比, 斜视角越大, 假设 $\Delta x(t) \approx 0$ 引入的误差将越大, 说明斜视成像几何下考虑残余航向误差是必要的。将式(2)中视线运动误差 $\Delta r_{\text{los}}(t, R_B; \theta)$ 用式(7)近似替代, PRF调整后的瞬时斜距可表达为

$$\begin{aligned} R(t; R_0) = & \sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2} \\ & + \Delta r_{\text{los}}(t, R_B; \theta) \\ = & \sqrt{(vt - x_n)^2 + R_0^2 - 2R_0 \sin \theta_0 (vt - x_n)} \\ & + \Delta r'_{\text{los}}(t, R_B; \theta_0) \\ = & R_1(t, R_0) + \Delta r'_{\text{los}}(t, R_B; \theta_0) \quad (8) \end{aligned}$$

其中, $R_1(t, R_0) = \sqrt{(vt - x_n)^2 + R_0^2 - 2R_0 \sin \theta_0 (vt - x_n)}$ 为理想飞行条件下目标 S_1 的瞬时斜距, 假设雷达发射FMCW信号, S_1 的回波可以表示为^[23]

$$\begin{aligned} s(t; R_0) = & \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t; R_0)\right) \\ & \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} K_r (R(t; R_0) - r_c) \left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\ & \cdot \exp\left(j \frac{4\pi}{c^2} K_r (R(t; R_0) - r_c)^2\right) \quad (9) \end{aligned}$$

其中, r_c 为去调频处理时的参考距离, K_r 为信号的调频斜率, λ 为发射信号中心频率所对应的波长。将式(8)代入式(9), 并忽略残余视频相位(Residual Video Phase, RVP)项的影响, 得到目标 S_1 去调频处理后的回波形式:

$$\begin{aligned}
s(\hat{t}, t_m; R_0) &= \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R_1(t, R_0)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r(R_1(t, R_0) - r_c)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}K_r(R_1(t, R_0) + \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0) - r_c)^2\right)
\end{aligned} \tag{10}$$

接下来讨论斜视成像时对视线运动误差的补偿方法。

3 基于运动测量参数的斜视成像视线运动误差补偿

为了解决大斜视角成像时距离与多普勒耦合严重的问题, 首先采用距离走动校正(Range Walk Correction, RWC)去除斜视成像几何引入的线性距离走动。将理想瞬时斜距 $R_1(t, R_0)$ 在 $vt - x_n$ 点进行泰勒级数展开, 并保留到3阶项, 得到

$$\begin{aligned}
R_1(t, R_0) &\approx R_0 - \sin\theta_0(vt - x_n) + \frac{\cos^2\theta_0}{2R_0}(vt - x_n)^2 \\
&\quad + \frac{\sin\theta_0\cos^2\theta_0}{2R_0^2}(vt - x_n)^3 \\
&= R_0 + x_n\sin\theta_0 - vt\sin\theta_0 \\
&\quad + \frac{\cos^2\theta_0}{2R_0}(vt - x_n)^2 \\
&\quad + \frac{\sin\theta_0\cos^2\theta_0}{2R_0^2}(vt - x_n)^3
\end{aligned} \tag{11}$$

其中, 线性项为 $-vt\sin\theta_0$, 代表距离走动, 补偿的方法是在二维时域乘以共轭校正因子^[21]:

$$\begin{aligned}
H_{\text{RWC}}(\hat{t}, t_m) &= \exp\left(j\frac{4\pi}{c}K_r\Delta R(t_m)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right) + j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta R(t_m)\right)
\end{aligned} \tag{12}$$

其中, $\Delta R(t_m) = -vt_m\sin\theta_0$, RWC后, 代入式(7), 目标 S_1 的瞬时斜距可重写为

$$\begin{aligned}
R'_1(t, R_0) &\approx R'_1(t_m, R_0) + \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0) \\
&\quad + v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}
\end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
R'_1(t_m, R_0) &\approx \sqrt{R_0^2 + v^2\cos^2\theta_0\left(t_m - \frac{x_n}{v}\right)^2} + x_n\sin\theta_0 \\
&\quad + \frac{v^3\sin\theta_0\cos^2\theta_0}{2R_0^2}\left(t_m - \frac{x_n}{v}\right)^3
\end{aligned} \tag{14}$$

式(13)和式(14)说明, RWC后, 等效飞行速度变为 $v\cos\theta_0$, 相当于参考航迹发生了旋转, 如图1所示, 成像坐标系的参考航迹相当于从原来的位置逆时针旋转 θ_0 变为平行于 X' 轴, 新的成像坐标系为 $X'Y'Z$, 多普勒中心也从原来的 $f_{\text{dc}} = 2v\sin\theta_0/\lambda$ 补偿为0, 目标 S_0 对应的零多普勒斜距由 R_B 变为 R_0 , 此时只要保证方位向采样率高于回波多普勒带宽, 就可以沿方位向抽样降低数据量, 不会出现多普勒混叠的现象。目标 S_1 的基频回波重写为

$$\begin{aligned}
s(\hat{t}, t_m; R_0) &= \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R'_1(t_m, R_0)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
&\cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}K_r(R'_1(t_m, R_0) + \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_B; \theta_0) - r_c)^2\right)
\end{aligned} \tag{15}$$

校正后目标 S_1 的斜距由 R_0 变为 $R_S = R_0 + x_n\sin\theta_0$, 说明在进行距离走动校正后, 其原始多普勒调频率相对新的距离位置存在误差, 误差大小近似为

$$\begin{aligned}
\Delta f_{\text{DR}} &= -\frac{2v^2\cos^2\theta_0}{\lambda R_0} + \frac{2v^2\cos^2\theta_0}{\lambda R_S} \\
&= -\frac{2v^3\cos^2\theta_0\sin\theta_0}{\lambda R_0^2}t_0 = k_{\text{ASC}}t_0
\end{aligned} \tag{16}$$

其中, $t_0 = x_n/v$ 为目标 S_1 相对零多普勒中心的时间偏移, k_{ASC} 为方位二次压缩因子, 式(16)说明距离走动校正后引入了方位空变的多普勒调频率误差。这一误差会使孔径边缘目标的方位向聚焦性能恶化, 影响成像的聚焦深度, 一般可采用方位向非线性调频处理补偿^[2,3], 限于篇幅, 本文仅讨论运动误差的补偿。在补偿视线运动误差时, 可忽略式(15)中第6项和第7项中的较小量, 则有

$$\begin{aligned}
& s(\hat{t}, t_m; R_0) \\
& \approx \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R'_1(t_m, R_0)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_0; \theta_0)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{c}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{c^2}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)^2\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(j\frac{8\pi}{c^2}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_0; \theta_0)\right)
\end{aligned} \tag{17}$$

其中, 第2, 5, 6项是脉间视线运动误差引起的, 第3项是脉内连续运动误差引起的。

对视线运动误差的校正一般分为距离空不变视线运动误差和距离空变视线运动误差校正两步进行, 第1步又称为一致校正或1阶校正, 第2步称为2阶校正, 1阶校正只能在二维时域进行, 以场景中心距离作为参考距离 R_{ref} , 将FMCW SAR的1阶校正因子修正为

$$\begin{aligned}
H_{\text{mc1}} & = \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_{\text{ref}}; \theta_0)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}v'_{\text{los}}(t_m; \theta_0)\hat{t}\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(j\frac{4\pi}{c}K_r\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_{\text{ref}}; \theta_0)\left(\hat{t} - \frac{2r_c}{c}\right)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(-j\frac{8\pi}{c^2}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_{\text{ref}}; \theta_0)\right)
\end{aligned} \tag{18}$$

其中

$$\begin{aligned}
\Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_{\text{ref}}; \theta_0) & = \Delta y(t_m) \sin \beta_{\text{ref}} \cos \theta_0 \\
& \quad + \Delta z(t_m) \cos \beta_{\text{ref}} \cos \theta_0 \\
& \quad - \Delta x'(t_m) \sin \theta_0
\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
v'_{\text{los}}(t_m; R_{\text{ref}}; \theta_0) & = (v_y(t_m) \sin \beta_{\text{ref}} \cos \theta_0 \\
& \quad + v_z(t_m) \cos \beta_{\text{ref}} \cos \theta_0)\hat{t}
\end{aligned} \tag{20}$$

经过1阶运补后, 完成了以场景中心距离 R_{ref} 和场景中心俯仰角 β_{ref} 为参考的运动补偿后, 接着在二维频域进行一致距离弯曲校正和二次距离压缩, 然后在距离压缩域-方位时域完成距离空变视线运动误差的补偿, 2阶校正因子为

$$\begin{aligned}
H_{\text{mc2}} & = \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r_v(t_m, R_0; \theta_0)\right) \\
& \quad \cdot \exp\left(-j\frac{8\pi}{c^2}K_r(R'_1(t_m, R_0) - r_c)\Delta r_v(t_m, R_0; \theta_0)\right)
\end{aligned} \tag{21}$$

其中, $\Delta r_v(t_m, R_0; \theta_0) = \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_0; \theta_0) - \Delta r'_{\text{los}}(t_m, R_{\text{ref}}; \theta_0)$ 。

4 旋翼无人机载航向残余位移误差提取与影响分析

接下来给出残余航向位移误差的提取方法。以4旋翼无人机为例, 在成像几何关系中, 由于作用距离近, 可忽略地球曲率的影响, 如图1所示。以飞机的预定航迹为参考航迹构成 X 轴, 侧向为 Y 轴, 天向为 Z 轴构成右手直角坐标系, XYZ 确定为成像坐标系, 成像坐标系通常以雷达开始成像的位置为坐标原点。在此之前, 需通过对东北天3方向的速度积分得到在东北天(ENU)坐标系上的位移 $[x_g(t_m), y_g(t_m), z_g(t_m)]$, 再通过坐标系的旋转因子将ENU坐标系中的位置数据转换到成像坐标系中, 从ENU坐标系到成像坐标系的变换时仅考虑偏航角的影响, 坐标转换关系为

$$\begin{aligned}
& [x_i(t_m) \quad y_i(t_m) \quad z_i(t_m)]^T \\
& = T_{gi} [x_g(t_m) \quad y_g(t_m) \quad z_g(t_m)]^T
\end{aligned} \tag{22}$$

其中, ENU到XYZ坐标系的转换矩阵

$$T_{gi} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{\text{ref}} & \sin \alpha_{\text{ref}} & 0 \\ -\sin \alpha_{\text{ref}} & \cos \alpha_{\text{ref}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{23}$$

其中, α_{ref} 为参考航迹角, 经过坐标转换得到雷达在成像坐标系下的3方向位移 $[x_i(t_m), y_i(t_m), z_i(t_m)]$, 在此基础上求解得到慢时间点上的位移误差为

$$\begin{cases} \Delta x'(t_m) = x_i(t_m) - I_1(x(t_m)) \\ \Delta y(t_m) = y_i(t_m) \\ \Delta z(t_m) = z_i(t_m) - H \end{cases} \tag{24}$$

其中, $I_1(x(t_m))$ 表示对航向位移的线性拟合值, 代表匀速飞行条件下沿航向的位移。同理, 成像坐标系下的3方向速度也可以用坐标变换求得

$$\begin{aligned}
& [v_x(t_m) \quad v_y(t_m) \quad v_z(t_m)]^T \\
& = T_{gi} [v_e(t_m) \quad v_n(t_m) \quad v_u(t_m)]^T
\end{aligned} \tag{25}$$

其中, $[v_e(t_m), v_n(t_m), v_u(t_m)]$ 表示东北天3方向的速度。相对传统FMCW SAR成像运动补偿流程, 在系统完成实时PRF调整后, 利用式(22)–式(25)计算航向和其他方向的位移误差, 再利用式(7)计算得到修正的视线运动误差, 无需进行基于数据的运动补偿, 即可获得聚焦性能良好的图像, 相对传统的1阶、2阶运动误差补偿算法没有增加运算量, 如果对输出的复图像进一步采用相位梯度自聚焦算法进行精确运动补偿, 则得到的成像处理流程如图2所示。

实时PRF调整和Dechirp处理后输出的原始数

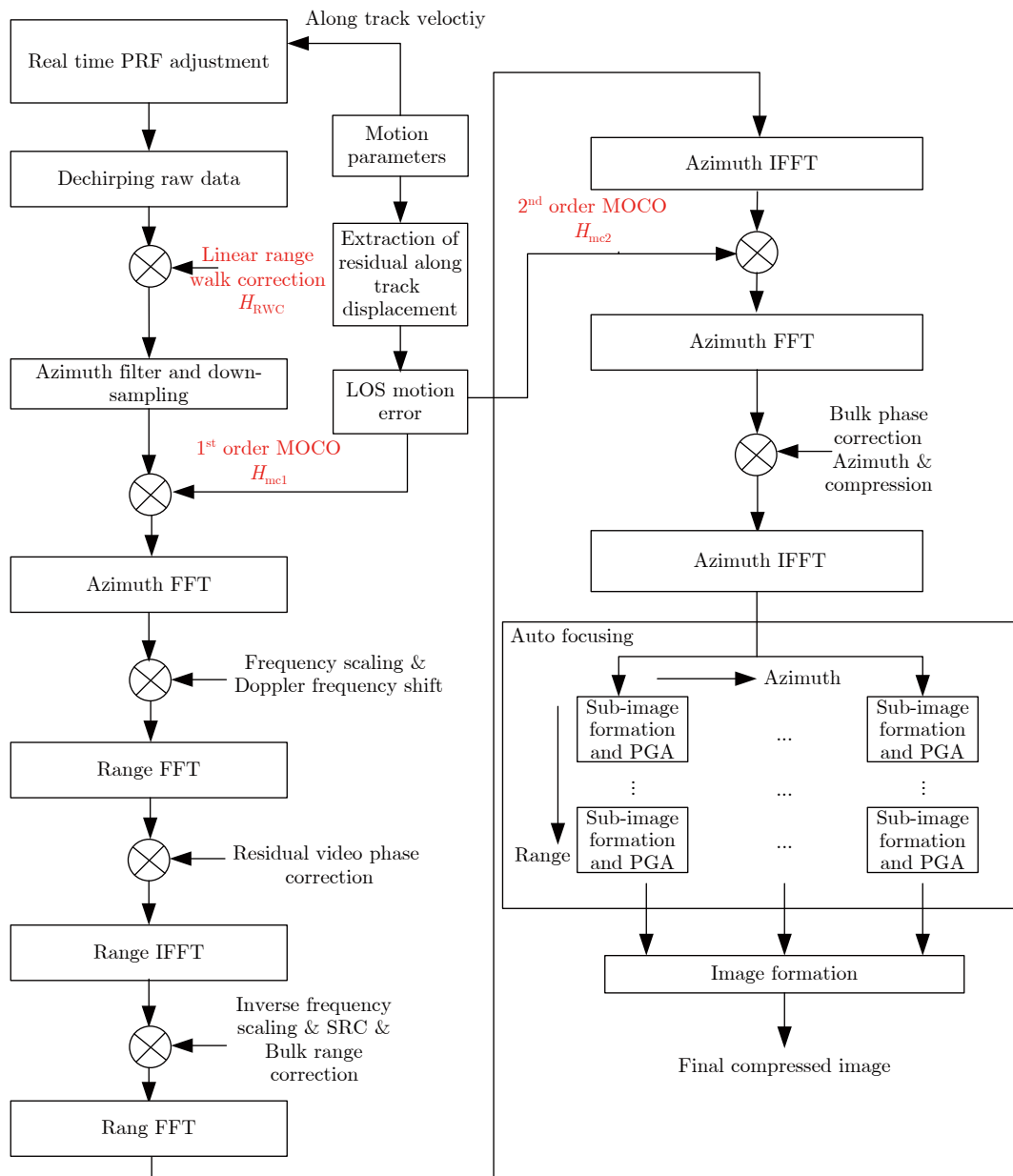


图 2 旋翼无人机FMCW SAR斜视成像处理流程

Fig. 2 Flow chart of squint FMCW SAR imaging for multirotor UAV

据，首先通过 H_{RWC} 完成距离走动校正，再通过方位向滤波和下采样降低方位采样率；然后在二维时域用 H_{mc1} 完成1阶运动补偿，采用频率变标算法完成RVP校正、二次距离走动校正(Secondary Range Correction, SRC)和一致校正；接着在方位时域、距离频域用 H_{mc2} 完成2阶运动补偿，进行方位向压缩后即得到复图像，如果需要引入精补偿，可以对无人机下传的复图像沿距离向分块、沿方位向划分子孔径，然后对每一块图像进行PGA，将重新输出的子图像拼接起来即得到精确聚焦的图像。

接下来基于实测数据分析旋翼无人机平台的运动误差特点。图3(a)为对旋翼无人机一次航过运动参数解算后的3方向速度，其中蓝色曲线为航向实

际速度与参考速度的差值，可视为航向速度误差，波动范围为(-0.11 m/s, 0.26 m/s)；绿色和红色曲线分别为Y方向和Z方向的速度，可见3方向速度的变化频率都较快，说明旋翼飞机与固定翼飞机不同^[31]，其航向速度变化更快，这使得旋翼无人机载SAR难以通过频率差异分离3方向的位移误差，加大了基于数据进行运动补偿的难度。图3(b)给出了根据参考速度进行实时PRF补偿后残余的航向速度误差，补偿后速度误差波动范围为(-0.04 m/s, 0.06 m/s)，波动大幅减小，但仍存在残余速度误差，这主要是系统误差造成的。将残余速度误差沿航向积分得到残余航向位移误差如图3(c)所示，表明航向位移误差在一次成像过程中变化较快，近似

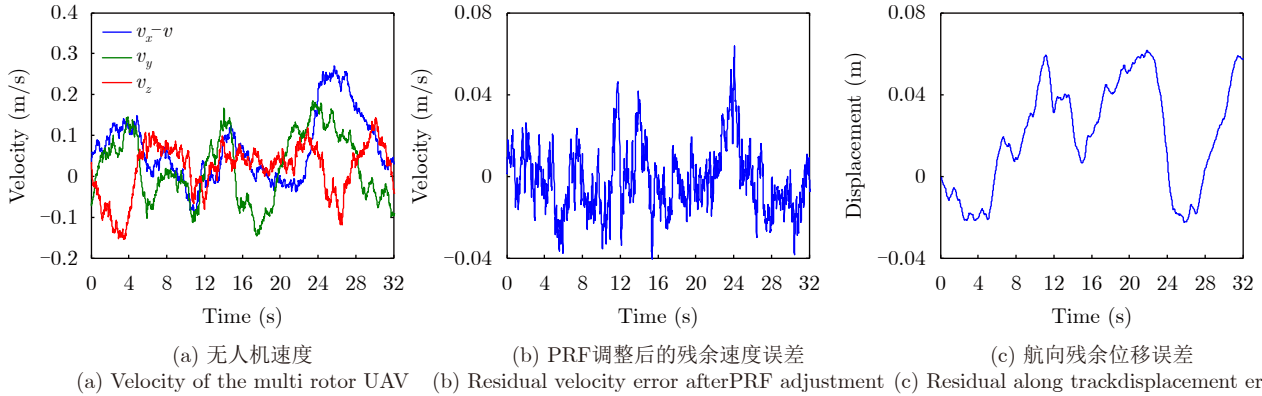


图3 旋翼无人机的速度特点以及PRF调整后的航向位移误差

Fig. 3 Velocity characteristics of multirotor UAV and along track displacement error after PRF adjustment

正弦变化, 所导致的包络和相位误差也呈相同的变化趋势。

合成孔径雷达对目标的方位压缩过程可视为对多普勒域线性调频信号的匹配滤波, 而航向残余位移误差将在回波中引入一个随慢时间变化的相位误差项, 根据成对回波理论^[32,33], 时域呈正弦变化的相位调制将在频域造成多对成对回波分量, 其中较强的分量经方位向匹配滤波后产生沿方位向的虚假目标, 较弱的分量则影响方位向积分旁瓣比(Integrated Side Lobe Ratio, ISLR)等指标。不妨采用正弦量描述残余航向位移误差, 令

$$\Delta x'(t_m) = A_e \cos(2\pi f_e t_m + \phi_0) \quad (26)$$

其中, A_e 和 f_e 分别对应误差的幅度和频率, f_e 反映误差相对孔径时间的变化快慢, ϕ_0 为初相位角, 由于 $\Delta x'(t_m)$ 幅度较小, 此处仅考虑其引入的相位误差对聚焦的影响, 根据式(7), $\Delta x'(t_m)$ 引入的视线方向相位误差为

$$\begin{aligned} e(f_e, t_m) &= \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta x'(t_m) \sin \theta\right) \\ &= \exp(j b_1 \cos(2\pi f_e t_m + \phi_0)) \end{aligned} \quad (27)$$

其中, $b_1 = 4\pi A_e \sin \theta / \lambda$, 将式(27)作第1类贝塞尔函数展开^[34], 可得

$$\begin{aligned} e(f_e, t_m) &= J_0(b_1) + 2 \sum_{k=1}^{k=\infty} j^k J_k(b_1) \cos(k(2\pi f_e t_m + \phi_0)) \\ &= \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} j^{|k|-k} J_{|k|}(b_1) \exp(jk(2\pi f_e t_m + \phi_0)) \end{aligned} \quad (28)$$

其中, $J_k(\cdot)$ 为 k 阶第1类贝塞尔函数, 表示第 k 个频率分量 $2k\pi f_e$ 对应的幅度加权系数。将式(28)乘以原始信号, 相当于对原来的信号沿慢时间进行了相位调制, 对应于原始回波二维频域信号 $SS(f_r, f_a; R_0)$,

则得到了理想频谱($k=0$ 时的频谱, 称为主谱)与多个重叠次谱($k \neq 0$ 时的频谱, 理想频谱的平移)的叠加, 引入误差后的二维频域信号可写为

$$\begin{aligned} SS_e(f_r, f_a; R_0) &= \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} j^{|k|-k} J_{|k|}(b_1) \\ &\cdot SS(f_r, f_a + k f_e; R_0) \end{aligned} \quad (29)$$

其中, f_r, f_a 分别表示距离频域和方位频域, $SS(f_r, f_a; R_0)$ 表示原来的二维频域信号。FMCW SAR的 f_r 实际对应的是距离压缩域, 因此误差对目标距离向位置影响不大。式(29)对应的重叠次谱所引起的方位向平移量为 $k f_e / f_{DR}$ ($k = \pm 1, \pm 2, \dots$), 其中 f_{DR} 为方位向多普勒调频率, 其幅度加权因子为 $J_k(b_1)$, 理论上意味着重叠次谱会造成方位向产生无穷对成对回波。若 $b_1 < 0.5$ rad, 正弦相位调制将只引起一对成对回波^[33], 其幅度为主波幅度的 $b_1/2$ 倍, 幅度远小于主波, 此时对航向位移误差的幅度要求为

$$A_e \leq \frac{0.5\lambda}{4\pi \sin \theta} \approx \frac{0.04\lambda}{\sin \theta} \quad (30)$$

说明要满足只产生一对成对回波, 航向位移误差的幅度容限很小, 当成像斜视角为 10° 时, 误差的幅度容限约为 0.23λ ; 当斜视角为 45° 时, 幅度容限约为 0.06λ , 斜视角越大, 幅度容限越小。若同时要求这对成对回波的方位向偏移也可以忽略, 则根据平台的飞行参数, 这对回波的方位向平移量需满足:

$$\frac{f_e}{f_{DR}} < \frac{\rho_a}{2} \Rightarrow f_e < \frac{\rho_a v^2 \cos^2 \theta}{2\lambda R_0} \quad (31)$$

根据表1所示的系统仿真参数, 雷达波长为 0.02 m, 假设系统设计方位分辨率为 0.2 m, 斜视角 10° 时, 对于场景中心的目标, 应满足 $f_e < 0.5$ Hz, 斜视角 45° 时, 对于场景中心的目标, 应满足 $f_e < 0.25$ Hz, 说明斜视角越大, 航向位移误差频率容限也越小。如图3(c)所示, 实际旋翼无人机的残余航向位移误

差不是低阶误差，而可视为多个简谐振动的叠加，因此在匹配滤波后将在目标方位向上形成大量假目标。

5 点目标仿真性能分析

采用表1所示的机载SAR参数开展点目标仿真实验，评估PRF调整后残余航向位移误差对成像的影响。由斜视成像的分辨率 $\rho_a = \lambda R_0 / (2vT_a \sin \theta)$ ，合成孔径时间 $T_a \approx 5$ s，假设与航向正交的位移误差为0，在仿真中加入不同频率和不同幅度的正弦航向位移误差 $\Delta x'(t_m)$ 模拟PRF调制后的残余误差，令

$$\Delta x'(t_m) = A_e \cos(2\pi f_e t_m) = A_e \cos\left(2\pi \frac{l}{T_a} t_m\right) \quad (32)$$

其中， l 表示正弦误差在孔径时间 T_a 内的振荡周期

表 1 雷达系统仿真实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of radar systems

参数	数值	参数	数值
信号带宽	900 MHz	平台飞行速度	10 m/s
雷达中心频率	15 GHz	距离向采样率	10 MHz
信号时宽	400 μ s	场景中心斜距	1 km
去调频参考斜距	1 km	成像斜视角	10°/47°
参考脉冲重复频率PRF	2 kHz	方位向点数(抽样后)	2048
距离向点数	4096	平台飞行高度	200 m

数。仿真只针对场景中心处的点目标进行，采用图2所示频率变标成像算法成像，对比考虑(利用式(7)计算视线运动误差)和不考虑(利用式(6)计算视线运动误差)残余航向位移误差的成像效果；仿真选取了10°和47°两个斜视角，抽样后的方位向处理点数都使用2048点，一次成像孔径长度相同，因此成像后10°斜视角的方位分辨率要高于47°。

图4为斜视角10°成像时场景中心点目标聚焦后的等高线图，并用红色粗线标注了-13.2 dB的等高线。其中第1列和第3列为未补偿残余航向位移误差的聚焦效果，第2列和第4列则展示了补偿后的聚焦效果，采用式(12)校正距离走动后，等效于在 $X'Y'Z$ 坐标系下完成成像，因此图像中距离向和方位向的旁瓣是正交的。图4(a)和图4(b)为 $A_e = 0.23\lambda$, $l = 0.5$, $\theta = 10^\circ$ 的成像结果，此时误差的幅度和频率都处于误差容限范围内，不补偿误差对方位向聚焦影响不大，成像结果与补偿后没有明显差异，验证了第4节分析结论的正确性；图4(c)和图4(d)为 $A_e = 0.23\lambda$, $l = 2$, $\theta = 10^\circ$ 的成像结果，此时误差幅度未超出容限，但频率为容限的4倍，对方位压缩的影响表现为沿方位向在目标两侧出现一对弱假目标，其位置偏离原目标的主瓣区域(图4(c))，但目标主瓣没有受到影响，残余误差补偿后，假目标消失(图4(d))；图4(e)和图4(f)为 $A_e = \lambda$, $l = 0.5$, $\theta = 10^\circ$ 的成像结果，此时误差的幅度约为容限的4倍，频率未超出容限，影响表现为目标的主瓣方

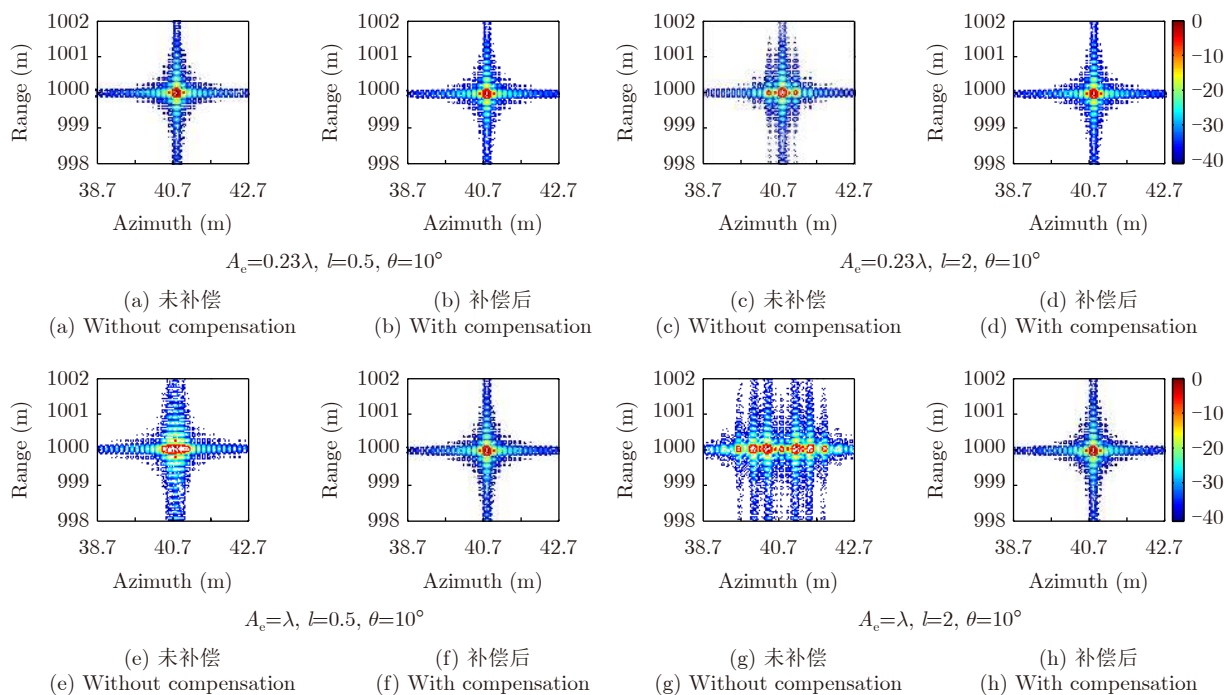


图 4 点目标的方位压缩结果($\theta_0 = 10^\circ$)

Fig. 4 Azimuthal compression results for point targets ($\theta_0 = 10^\circ$)

位向明显展宽, 这是由于误差幅度增大造成假目标增多, 但偏移量未大幅超出主瓣区域, 误差补偿后主瓣展宽消失。同时增大误差的幅度和频率, 图4(g)和图4(h)给出了 $A_e = \lambda$, $l = 2$, $\theta = 10^\circ$ 时的聚焦情况, 图4(g)中主瓣两侧出现了对称的多对假目标, 且假目标的强度超出主瓣的强度, 这是由于误差幅度和频率同时增大造成的, 同样, 残余航向误差补偿后的假目标消失(图4(h)), 说明本文所提算法补偿航向位移误差的有效性。

将成像斜视角增大为 47° , 也进行了点目标仿真实验, 根据第4节分析, 此时误差的幅度和频率容限将减小。图5(a)和图5(b)为 $A_e = 0.06\lambda$, $l = 0.25$, $\theta = 47^\circ$ 的成像结果, 此时误差的幅度和频率都处于第4节分析的容限范围内, 不补偿误差对方位向聚焦影响不大, 成像结果与补偿后没有明显差异; 图5(c)和图5(d)为 $A_e = 0.06\lambda$, $l = 2$, $\theta = 47^\circ$ 的成像结果, 此时误差幅度未超出容限, 但频率为容限的8倍, 对方位压缩的影响表现为沿方位向在目标两侧出现一对弱假目标, 其位置因误差频率较高偏离原目标的主瓣区域, 但对目标主瓣没有明显影响, 残余误差补偿后, 假目标消失; 图5(e)和图5(f)为 $A_e = \lambda$, $l = 0.25$, $\theta = 47^\circ$ 的成像结果, 此时误差幅度约为容限的16倍, 频率未超出容限, 由于成对回波分量的幅度和数量增加, 假目标强度增大, 数量明显增多, 但误差频率较低其偏移量较小, 导致未补偿目标的主瓣明显展宽(图5(e)), 残余航向误差

补偿后主瓣展宽消失(图5(f))。进一步增大误差的幅度和频率, 图5(g)和图5(h)给出了误差增大到 $A_e = \lambda$, $l = 2$, $\theta = 47^\circ$ 时的情况, 此时主瓣两侧出现了多对对称的假目标, 且假目标的强度超出目标的强度(图5(g)), 与图4(g)类似, 这是正弦误差幅度和频率超出容限的结果。同样, 误差补偿后的假目标基本消失, 图像聚焦效果明显改善。但是, 与图4(h)相比, 可以观察到图5(h)中目标两侧仍存在一对弱假目标, 说明随着斜视角的增大, 由于误差幅度容限减小, 存在高频误差时, 不能够完全消除其对旁瓣的影响, 会影响目标的旁瓣性能。

用式(2)推导残余航向位移误差时, 忽略了其随时间和目标位置变化的分量, 使得算法不能完全补偿航向位移误差, 虽然补偿后高频误差的幅度大幅减小了, 但残余的高频成分仍会产生弱假目标。根据式(3), 残余航向位移误差补偿中的近似会引入剩余误差 Δx_r , 为了尽量减小假目标对旁瓣的影响, 也要保证剩余误差只产生一对成对回波, 且其幅度远低于主瓣的幅度, 对于场景中心目标, 有

$$\begin{aligned} \Delta x_r &\approx \frac{\Delta x(t)(vt)}{\sqrt{(vt - R_0 \sin \theta_0 - x_n)^2 + R_B^2}} \\ &\approx \frac{\Delta x(t)(vt)}{R_0} < \frac{\Delta x(t) v T_a}{R_0} \end{aligned} \quad (33)$$

根据式(29)和式(30), 对补偿后的剩余航向位移误差的幅度要求近似为

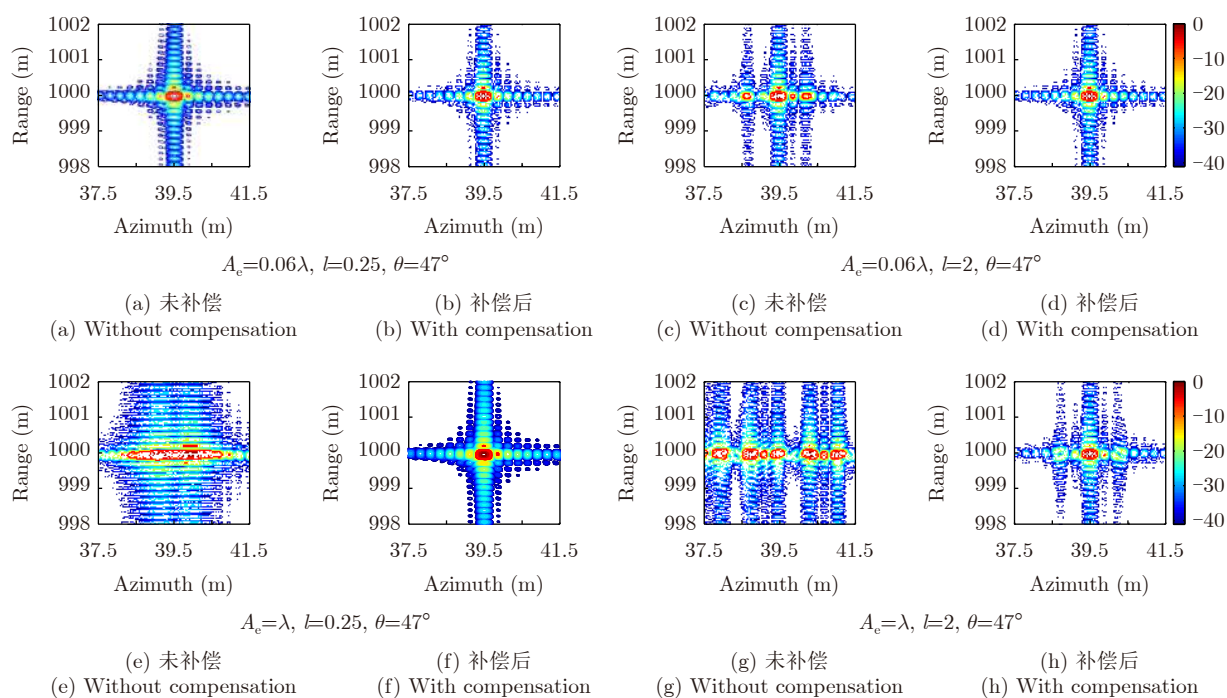


图 5 点目标的方位压缩结果($\theta_0 = 47^\circ$)

Fig. 5 Azimuthal compression results for point targets ($\theta_0 = 47^\circ$)

$$\frac{vT_a A_e}{R_0} \leq \frac{0.5\lambda}{4\pi \sin \theta} \Rightarrow A_e \leq \frac{0.5\lambda R_0}{4\pi v T_a \sin \theta} \quad (34)$$

由表1给出的仿真参数, 当斜视角为 47° , 本文所提算法对误差补偿的幅度容限约为 1.09λ , 相对不进行残余航向误差补偿, 误差的幅度容限提高约为原来的18倍, 至少提升了一个数量级, 而对于非场景中心目标, 由于 x_n 的影响不能忽略, 误差的幅度容限会有一些变化, 为简化分析, 此处忽略其影响。图6对比了斜视角 47° 条件下对不同正弦误差补偿后的点目标成像等高线图, 并用红色粗线标注了 -13.2 dB的等高线。图6(a)中, 对于 $l=2$ 的高频误差, 误差幅度为 3λ 时出现了4个超出 -13.2 dB假目标, 而图6(b)误差幅度为 1.09λ 时, 原目标附近虽然也出现了假目标, 但假目标没有超出 -13.2 dB。对于 $l=0.25$ 的低频误差, 幅度误差为 3λ 和 2.26λ 时原目标附近都没有明显的假目标, 只是主瓣的宽度略有增大, 说明尽管高波段SAR成像对误差幅度和频率均敏感, 但相对幅度增大, 频率增高的影响更难

消除。当斜视角较大且误差频率较高时, 目标的旁瓣受到假目标的影响会抬高, 这种高频误差会导致假目标增多, 背景杂波抬高, 因此无人机平台应尽量减小高频振动对系统天线相位中心的影响。此外, 当运动误差在孔径时间内变化缓慢时, 可通过多项式将其展开为线性、2阶以及更高阶误差, 称为多项式误差, 采用本文所提算法可以将多项式误差视为低频运动误差, 根据理论推导和仿真实验结果分析, 对于低频误差, 无论斜视角大小, 主要造成主瓣展宽, 采用本文所提算法可以获得较好的补偿效果。而对于随机相位误差, 由于变化太快, 本文所提算法难以补偿。

6 实测数据处理结果和算法性能分析

6.1 实测数据运动误差提取和包络补偿结果

为检验所提运动补偿算法的有效性, 开展了飞行实验验证。实验采用的雷达系统为湖南长沙瑞感知信息科技有限公司研制的Ku波段SAR系统, 该雷

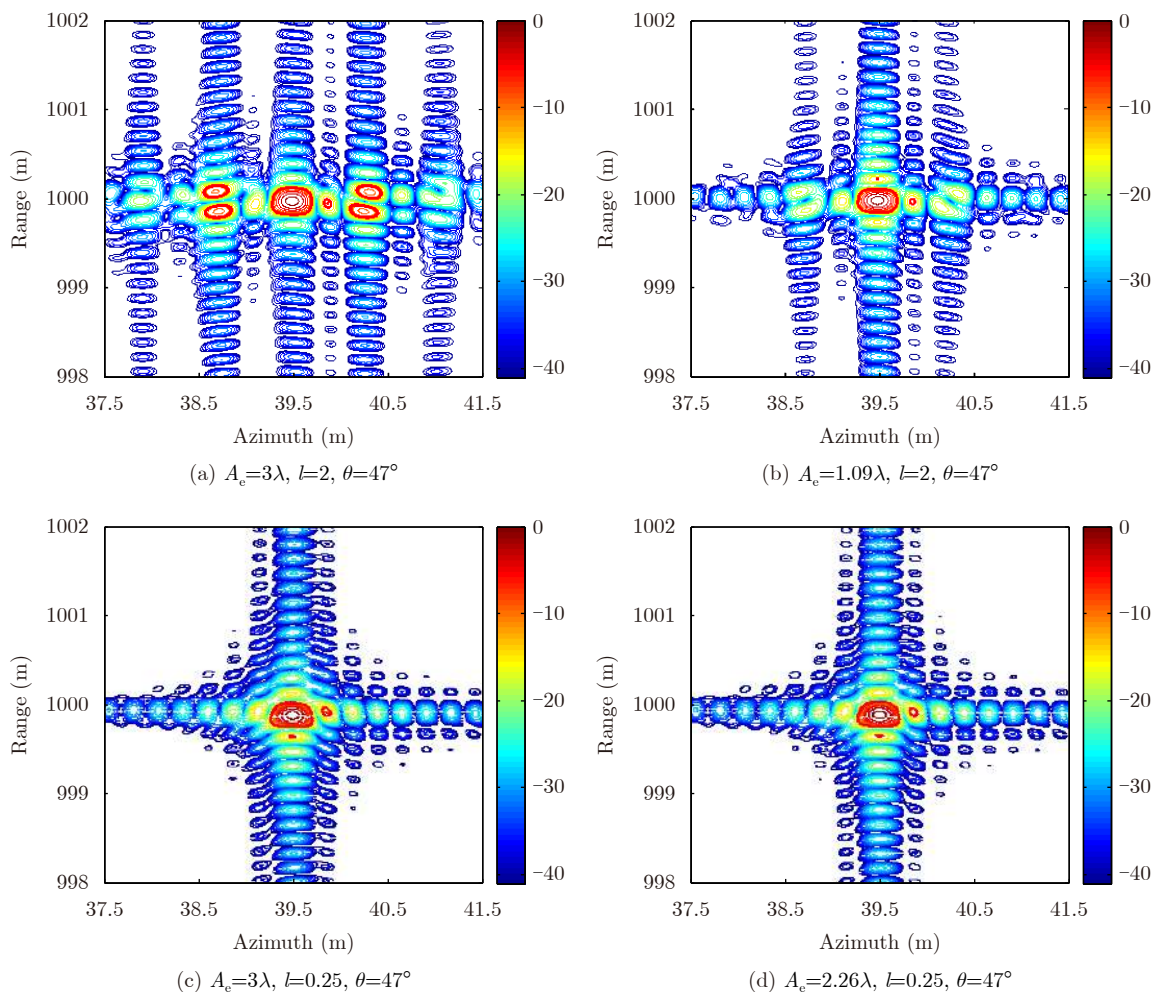


图6 本文算法误差容限下的点目标方位压缩结果($\theta_0 = 47^\circ$)

Fig. 6 Azimuthal compression results for point targets under error limit of our proposed algorithm ($\theta_0 = 47^\circ$)

达具备两轴姿态补偿、实时PRF调整和正侧视成像能力,但不具备斜视成像能力。雷达系统发射宽带FMCW信号,采用Dechirp接收方式。实验中将雷达系统搭载在4轴8桨旋翼无人机上(如图7(a)所示),系统实验参数如表1所示,除系统中心频率稍有差异,平台实际飞行速度约为8 m/s,方位向点数增大为8192点外,其他参数都相同。多旋翼无人机上安装的GNSS/INS惯性测量单元水平定位精度为1 m STD,垂直定位精度为2 m STD,测速精度为0.05 m/s 1σ 。对斜视成像原始数据采用传统算法和本文所提算法分别进行运动补偿后,基于图2给出的频率变标算法完成了斜视SAR成像。

图7(b)所示为对图3中航过分别采用传统正侧视视线误差提取方式(式(5))、传统斜视视线误差提取方式(式(6))和本文所提方法(式(7))得到的误差曲线,图7(b)中蓝色点虚线为采用正侧视成像几何关系计算的结果,未考虑残余航向位移误差和斜视角;绿色虚线为采用传统斜视成像几何关系计算的结果,未考虑残余航向位移误差 $\Delta x'(t)$;而红色实线为采用本文所提方法计算得到的修正视线运动误差,同时考虑了斜视角和残余航向位移误差。可以

观察到忽略斜视角引入的误差很大,说明斜视成像时必须考虑斜视角对视线误差的影响,同时也注意到后两条曲线的差异很小(见图7(c)),说明残余航向位移误差对包络线的校正影响不大。图7(c)中差值曲线的变化趋势与图3(c)一致,说明这一部分正是由航向残余位移误差造成的,尽管幅度最大只有7 cm,小于系统分辨率,却远远超过了雷达的波长,所产生的相位误差必然影响图像聚焦。

图8为分别采用图7(b)计算的3种视线误差进行基于1阶和2阶运动补偿后,在方位时域-距离压缩域获得的强点目标包络线,从包络线的形状和位置来看误差对包络的影响确实不大,但是图8(c)的包络线说明引入残余位移误差补偿视线误差后,包络线起伏和强度变化更小。

6.2 场景成像结果与指标分析

图9对比了分别采用3种视线误差进行运动补偿后的成像结果,以及结合PGA算法精确补偿运动误差后的成像结果,图中距离向和方位向处理均采用海明窗加权抑制旁瓣。图9(a)为成像场景2018年7月的卫星地图,实验数据于2019年底录取。图9(b)、

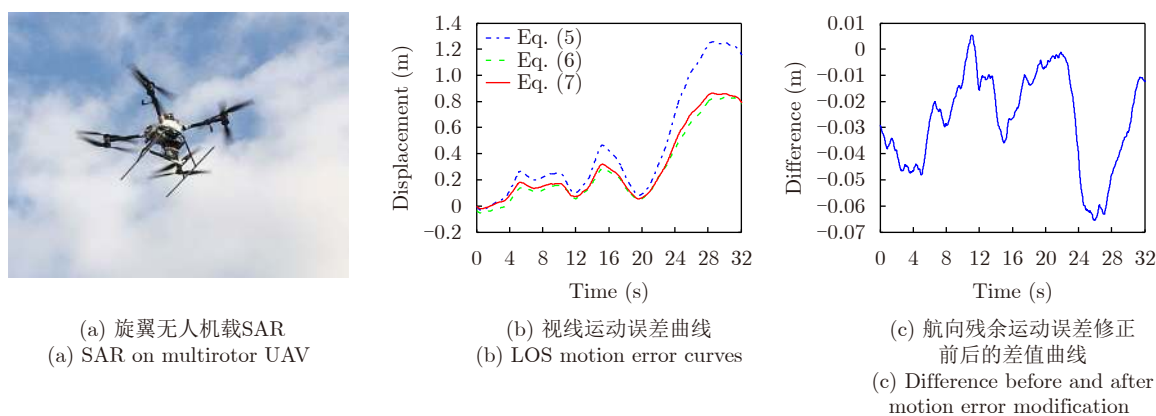


图7 无人机载SAR及采用式(5)–式(7)分别提取的视线误差曲线

Fig. 7 Multirotor UAV SAR and the LOS displacement curves extracted using Eqs. (5)–(7)

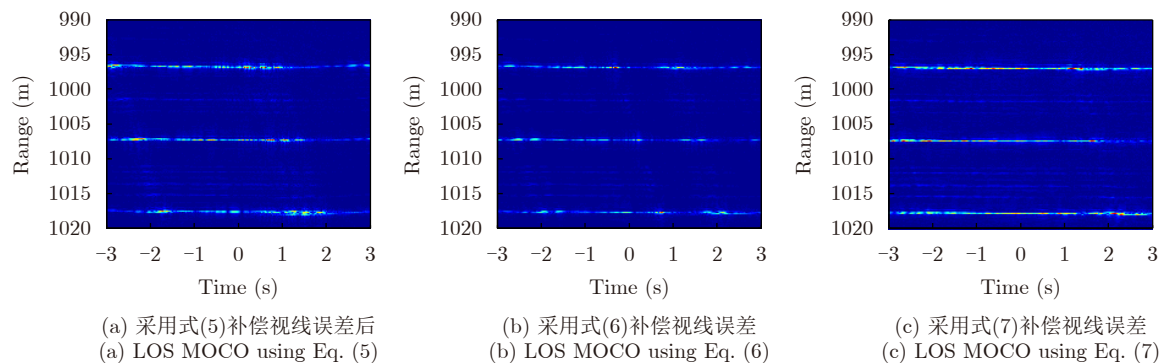


图8 完成视线运动补偿的距离包络曲线对比

Fig. 8 Comparison of range envelopes after LOS motion compensation

图9(c)和图9(e)为分别采用式(5)、式(6)和式(7)推导的视线运动误差进行运动补偿后成像的结果,图9(b)和图9(c)内的目标沿方位向发生了严重的散焦现象,图9(c)采用的视线运动误差考虑了斜视角

的影响,因此聚焦质量比图9(b)好一点,但是相比图9(e),方位向聚焦质量仍存在显著差距,说明即使残余航向位移误差很小,引入的相位误差也对图像方位聚焦性能造成了严重影响。这是因为雷达的

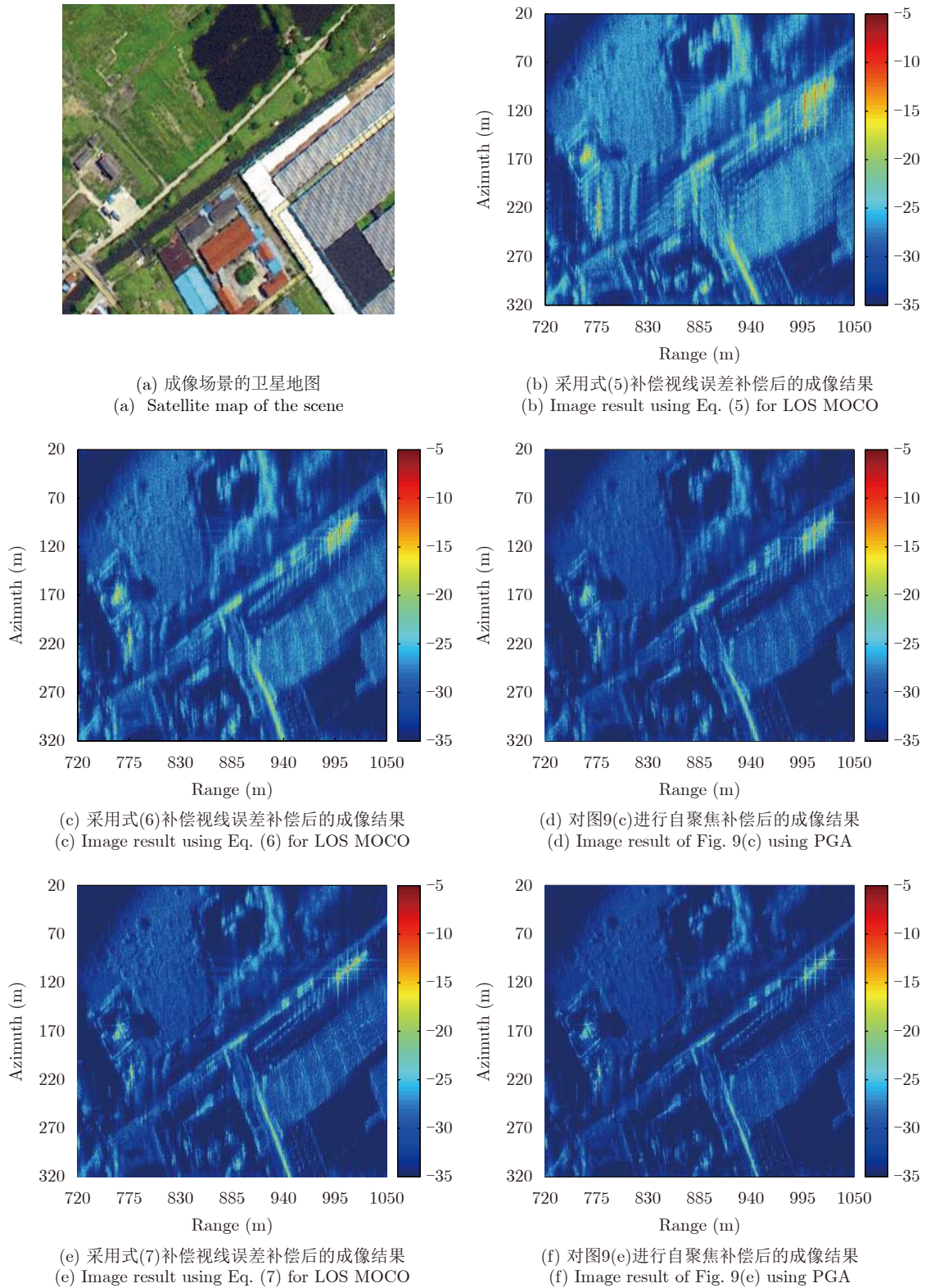


图9 视线运动误差补偿后的成像结果对比(斜视角47°)

Fig. 9 Comparison of image results after LOS motion error compensation (Squinted angle: 47°)

中心频率接近毫米波频段,残余误差相对波长的大小不能忽略,尤其是分辨率要求高,孔径时间长时,引入的相位误差对聚焦影响会更大。图9(d)和图9(f)分别给出了对复图像图9(c)和图9(e)采用基于对比度最优的PGA进行运动补偿后的成像结果,子块大小为512点 \times 512点,对应方位向划分为16个子孔径,每个子孔径对应时长为2 s,子孔径之间重叠128点,距离向划分为8个子段。

由图9(d)看出,如不修正残余航向误差,虽然相对图9(c)自聚焦补偿后图像的对比度有所提高,目标的方位分辨率也有了一定的改善,但是仍存在明显的散焦现象,这是由于PGA算法的性能受到图像初始成像质量影响,目标散焦过于严重导致分块的时候有一部分目标的能量位于相邻子块,无法实现运动误差的精确估计。而图9(f)给出了采用本文所提算法补偿残余航向位移误差后,再结合分块PGA算法进行精确补偿的结果,由于目标此时已

经完成了初步的聚焦,目标方位分布范围较小,初始图像SCR较高,自聚焦补偿后图像的聚焦性能得到进一步提高。

图10深入对比了残余误差修正前后图9中点目标的聚焦性能,图9(b)的散焦太严重,对比意义不大。选取场景中一个孤立点目标,对比误差修正前(从图9(c)和图9(d)提取)和修正后(从图9(e)和图9(f)提取)的成像结果,该目标位于图9中距离向850 m、方位向170 m附近。从图10(a)观察到目标沿方位向严重散焦,而且出现了多个假目标,说明残余误差不仅幅度较大,而且频率较高,引起了多个对称的假目标,进行PGA补偿后,点目标的聚焦性能有所改善(见图10(b)),但是一侧仍存在较多的远端旁瓣,这是因为此目标正好位于子块边缘,由于原始图像聚焦性能差,有一部分目标能量落入相邻子块中,导致目标误差估计不准确,无法精确聚焦。图10(c)则给出了修正视线误差后该点目标的成像

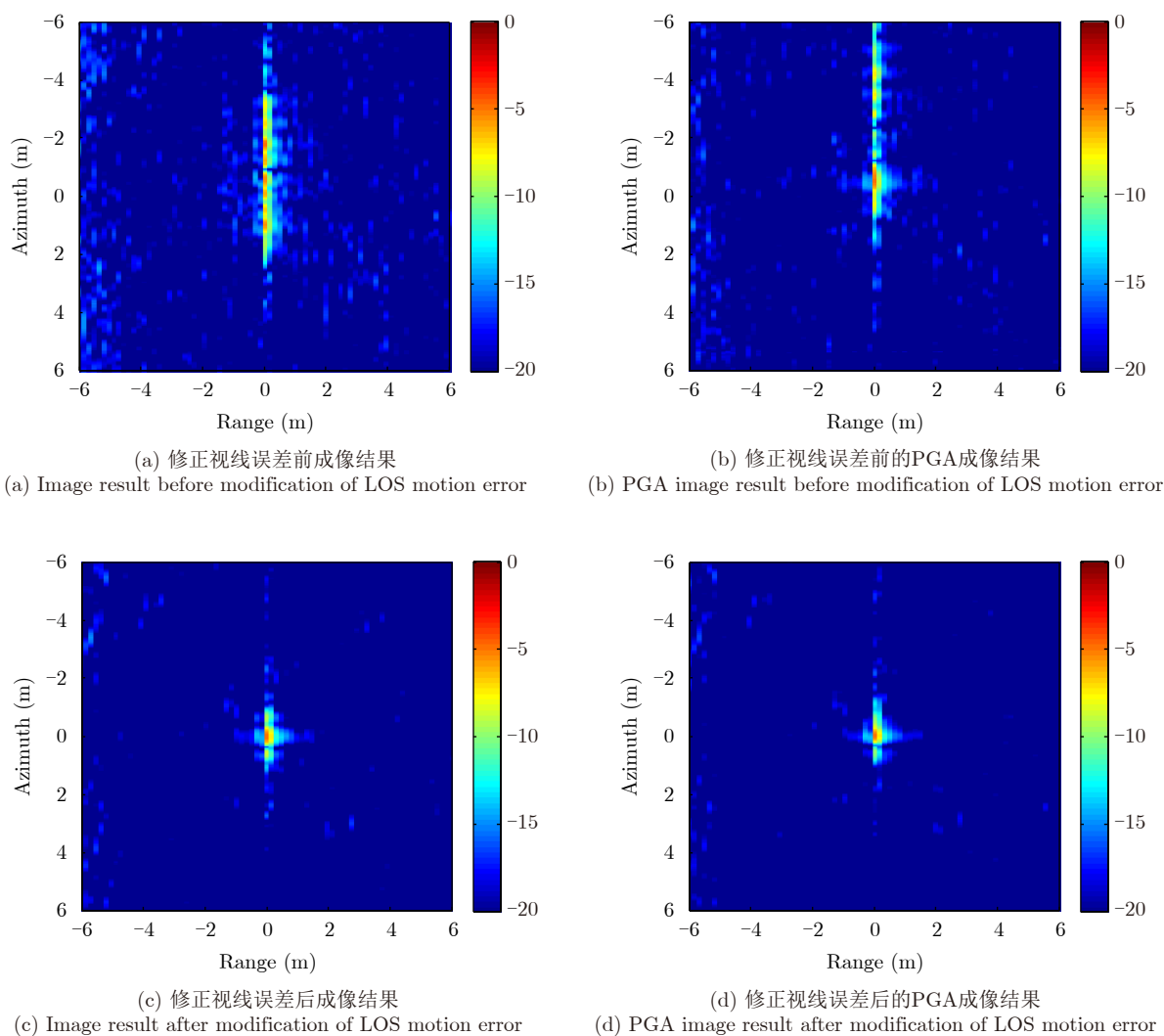


图 10 视线运动误差修正前后点目标的成像结果对比

Fig. 10 Comparison of image results before and after modification of LOS motion error

结果，目标的方位向聚焦效果显著提高，在此基础上进行PGA补偿后得到图10(d)，显示目标的方位向聚焦性能进一步改善。

图11绘制了该点目标沿距离向和方位向的剖面图，从图11(a)看出，不补偿残余航向误差对距离向主瓣的影响不大，但造成了距离向远端旁瓣的升高，这可能是由于附近目标的聚焦效果下降导致背景杂波电平抬高造成的。观察图11(b)的蓝色曲线发现，视线运动误差修正前目标沿方位向分裂为多个谱峰，即出现了多个由成对回波造成的假目标，而结合PGA补偿后观察到目标沿方位向的聚焦性能有所改善(如绿色曲线所示)，但左侧的旁瓣仍然很高，这就是因为分块时该目标第1部分能量落入了相邻子块，导致在相邻子块中的聚焦无法完成。此外，目标主瓣展宽外还发生了中心平移，这是因为原始目标散焦过于严重，在图像相关时无法对目标精确定位。视线运动误差修正后，如红色曲线所示，该目标在方位向聚焦性能明显改善，但是还存在较高的旁瓣，这是因为误差的频率较高，即使补偿后剩下的误差幅度较小，也会导致方位向旁瓣的升高，而经过PGA补偿后，目标方位剖面图中的旁瓣得到了一定程度的抑制。

表2对比了图11中点目标的二维成像指标，由于在成像过程中，对距离向和方位向信号加海明窗抑制旁瓣，因此目标的距离向分辨率相对理想距离分辨率展宽了1.33倍，约为0.22 m。进行了距离走动校正后目标的二维旁瓣是正交的，实验分析了目标沿距离向和方位向的分辨率、积分旁瓣比和峰值旁瓣比指标，其中：分辨率定义为目标的3 dB主瓣宽度，通过插值的方法进行测量；峰值旁瓣比(Peak Sidelobe Ratio, PSLR)定义为最大旁瓣与主瓣强度的高度比，以分贝表示；一维积分旁瓣比(ISLR)指标定义为^[35]

$$\text{ISLR} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{total}} - P_{\text{main}}}{P_{\text{main}}} \right) \quad (35)$$

其中， P_{total} 为旁瓣范围内所有目标的总能量， P_{main} 为其中主瓣的能量，主瓣宽度以峰值为中心，取分辨率的2倍，旁瓣范围取分辨率的20倍。由表2可知：采用修正后的视线运动误差因子补偿后，点目标的方位向性能指标均明显优于修正前的补偿效果。其中，方位分辨率从修正前的0.8976 m提升到修正后的0.3409 m，由图11(b)可以观察到修正前高频相位误差使得目标周围产生了多个假目标，且假目标的强度与原目标相当甚至更强，而修正后假

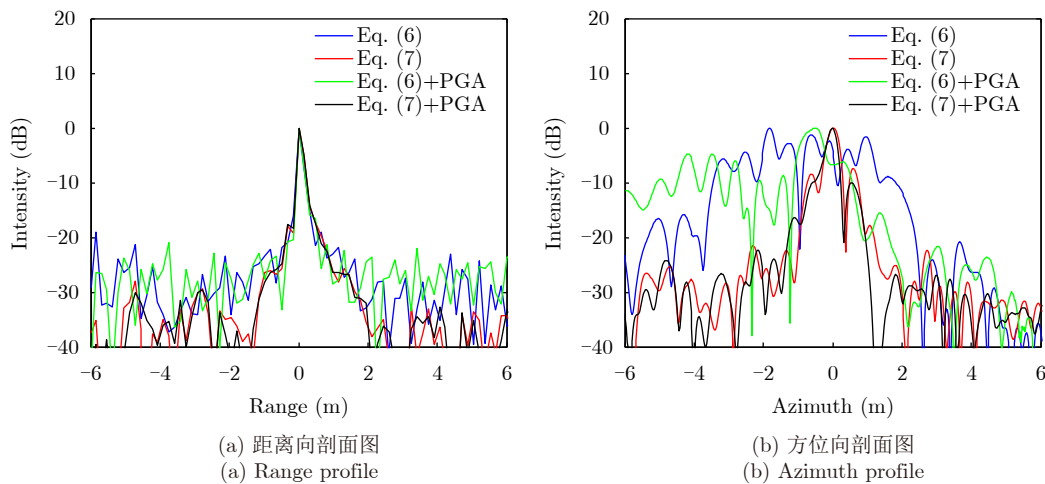


图 11 视线运动误差修正前后点目标的剖面图对比

Fig. 11 Comparison of profiles of a point target before and after modification of LOS motion error

表 2 图11中点目标成像性能指标对比

Tab. 2 Comparison of image performance of the point target in Fig. 11

运动误差补偿方法	距离分辨率(m)	方位分辨率(m)	距离向PSLR(dB)	方位向PSLR(dB)	距离向ISLR(dB)	方位向ISLR(dB)
视线误差修正前	0.2151	0.8976	-18.8341	-2.5750	-11.9464	4.6462
视线误差修正前+PGA	0.2140	0.6586	-21.2475	-6.2690	-12.7365	1.3083
视线误差修正后	0.2151	0.3409	-17.9402	-7.0802	-14.0103	-2.6761
视线误差修正+PGA	0.2182	0.3276	-17.6637	-10.0202	-14.2019	-3.1933

目标明显被抑制了, 因此测得的方位分辨率指标大幅改善; 此外, 未修正前的方位向PSLR和ISLR指标也受到了附近假目标的影响, 修正后目标的这两项旁瓣指标均有明显提升。但是, 也应注意到, 虽然目标的方位向聚焦性能整体有了较大的提升, 但并未达到理想值, 主要原因是残余航向位移误差的幅度偏大($A_e > 2\lambda$), 高频成分较多($l > 0.5$), 根据算法误差容限, 在大斜视成像时, 采用本文所提方法补偿后, 剩余的部分高频误差虽然幅度较小, 仍会导致主瓣的展宽和旁瓣的提升, 在采用PGA补偿后, 方位向PSLR指标由原来的 -7.0802 dB提升为 -10.0202 dB, ISLR指标由原来的 -2.6761 dB提升为 -3.1933 dB, 说明部分高频误差得到了补偿。目标的距离向指标受算法的影响较小, 其分辨率指标在PGA后略有变化, 距离向PSLR指标相对修正前则略有下降, 从图11(a)来看, 指标的下降并不明显, 距离向ISLR修正后改善的原因是图像整体

聚焦性能的改善降低了背景杂波电平。

6.3 算法场景适应性验证

由前文分析可知, 残余航向位移误差与系统误差和运动误差有关, 与目标的位置无关, 对不同距离的目标的影响体现在距离空变视线误差中, 需通过第3节推导的2阶运动误差补偿因子校正。为了验证本文所提算法对距离变化的适应性, 进一步对比了测绘带近端和远端目标的聚焦质量。系统采用FMCW体制, 所设计的成像测绘带宽度为500 m, 根据平台飞行高度200 m, 可知测绘带内的俯仰角变化范围为 $[64.5^\circ, 77.7^\circ]$, 变化范围达到 13° , 图12和图13分别给出了场景中近距离目标和远距离目标的成像结果。可以看出: 相对残余误差修正前的结果(图12(a)和图12(b)), 采用本文所提算法, 在场景近端图像聚焦性能明显提升(图12(c)和图12(d))。

图13为测绘带远端目标的成像结果, 采用本文

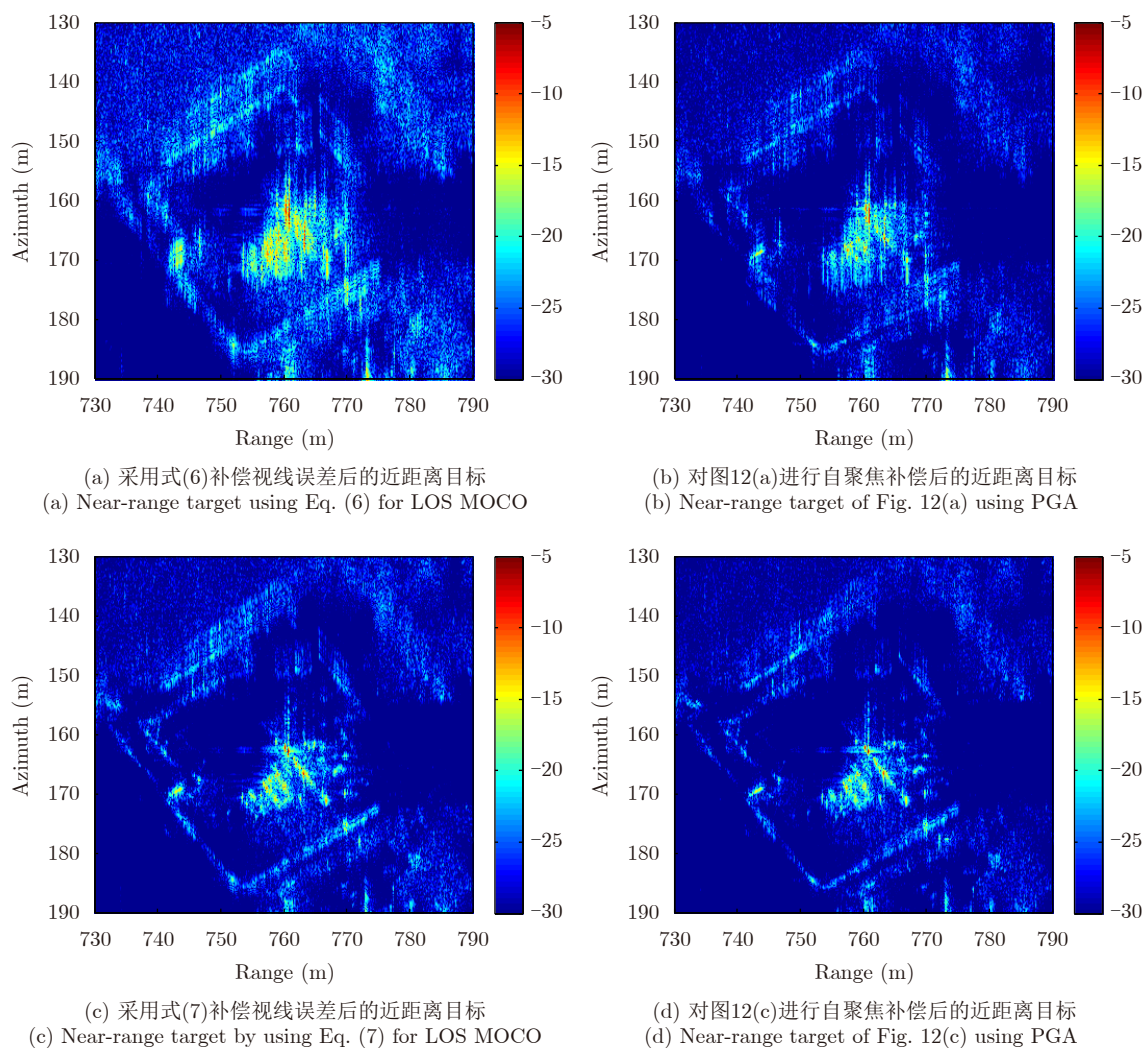


图 12 视线运动误差修正前后近距离目标图像对比

Fig. 12 Comparison of near-range target image before and after modification of LOS motion error

所提算法，也得到了类似的结果，但是图13(d)中目标自聚焦后质量提升更为明显。

自聚焦算法对初始图像SCR要求较高，通过选择特显点提取误差，而本文所提算法不依赖于场景特性。为验证算法适应性，在实测数据中选择了一帧目标分布比较均匀的田野场景。如图14所示，图像动态范围仅为15 dB，远小于图9的动态范围，采用修正前后的视线误差补偿后，得到的成像结果如图14(a)和图14(c)所示，基于复图像分别进行PGA补偿后的成像结果如图14(b)和图14(d)所示。对于这一缺乏特显点的均匀场景，不进行误差修正田间的道路和阴影几乎不可见，而本文所提算法不仅使得场景中心地物的阴影清晰可见(见图14(c))，PGA补偿后，目标阴影和道路轮廓更为清晰(见图14(d))，说明相对原来的误差补偿因子所提算法显著改善了自聚焦后图像的性能。

7 结语

本文研究了旋翼无人机载SAR大斜视角成像的运动补偿技术，重新推导了非理想运动条件下斜视SAR成像时目标瞬时斜距的表达式，指出以往认为实时PRF调整后航向误差可以忽略的做法在高波段SAR斜视成像条件下不一定成立。尽管残余航向误差引入的包络误差很小，但波长短导致引入的相位误差大，使得目标在方位上散焦，尤其是在大斜视条件下散焦严重。因此，引入残余航向位移误差修正了视线运动误差，更新了传统的1阶和2阶视线运动误差补偿因子，并分析了旋翼无人机航向误差的特点，给出了残余误差提取方法，推导了误差幅度和频率容限。点目标仿真实验验证所提方法能够将残余航向误差降低至少一个数量级，实测数据验证了所提方法能有效提升旋翼无人机FMCW SAR斜视成像的聚焦性能，并具有较好的场景适应性。本

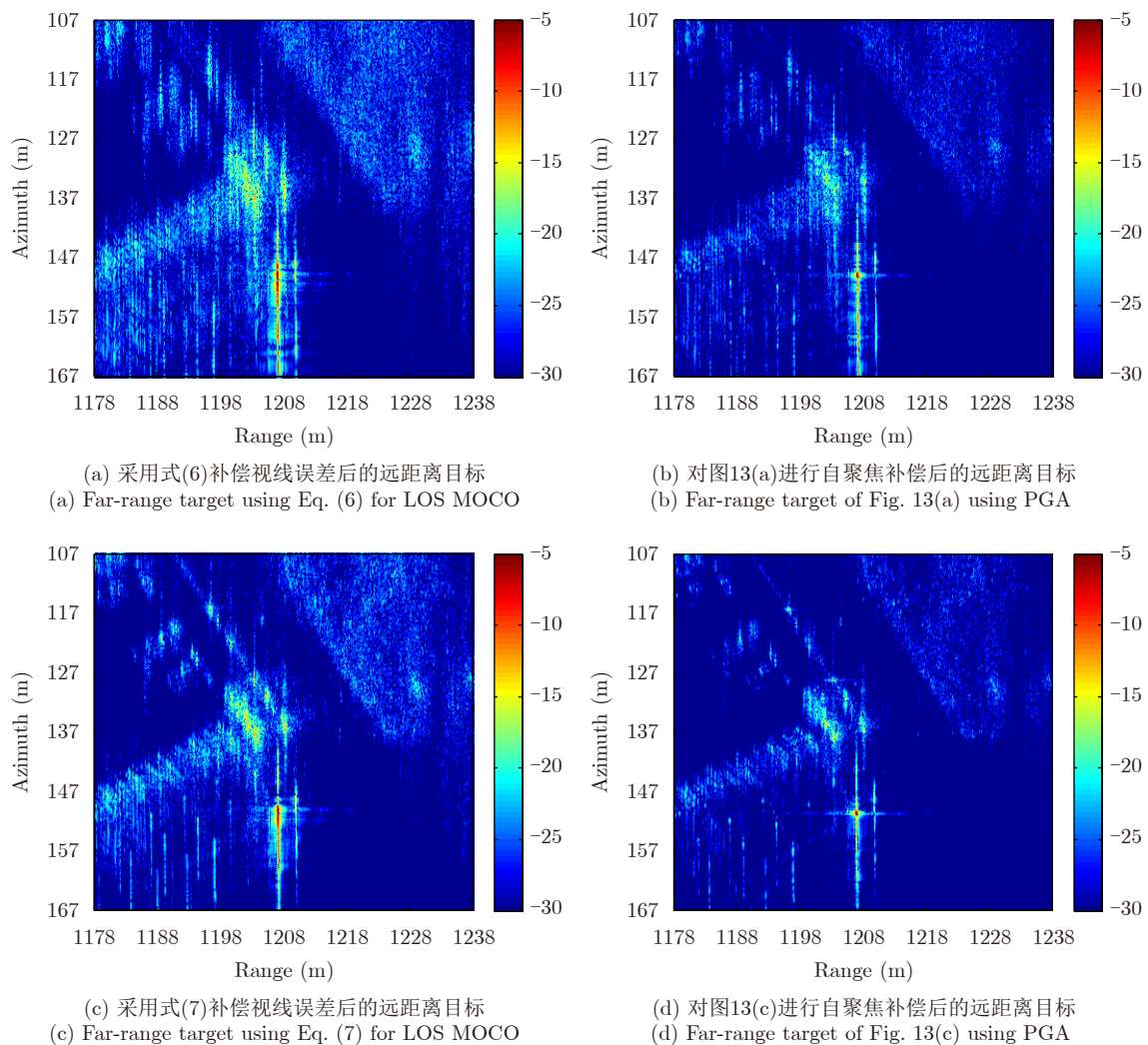


图 13 视线运动误差修正前后远距离目标图像对比

Fig. 13 Comparison of far-range target image before and after modification of LOS motion error

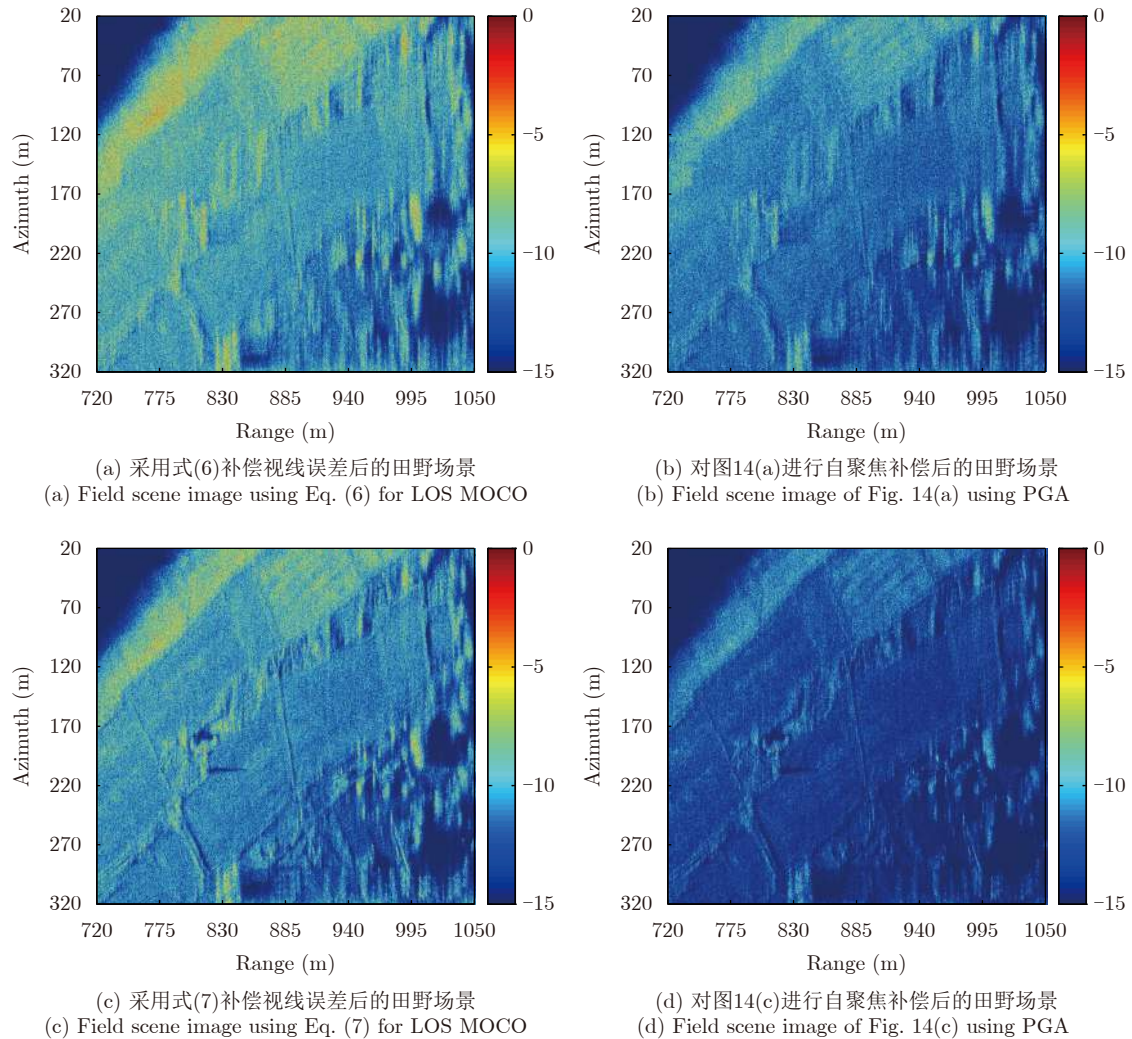


图 14 视线运动误差修正前后田野场景成像对比

Fig. 14 Comparison of images of a field scene before and after modification of LOS motion error

文算法基于运动测量参数实现运补, 无需结合数据进行运动补偿就能够获得较高的成像质量, 具有运算量小、性能改善显著的优势, 既可以用于无人机电载SAR的实时成像, 也可以支撑后续PGA高精度运补, 因此具有重要理论意义和实际应用价值。由于本文算法仅进行了基于测量参数的运动补偿和基于图像分块的自聚焦补偿, 目标聚焦质量有进一步提升空间, 后续将结合基于子孔径的迭代自聚焦运动补偿方法进一步降低高频相位误差对成像的影响。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Song, YANG Lei, ZHAO Lifan, *et al.* Quasi-polar-based FFBP algorithm for miniature UAV SAR imaging without navigational data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(12): 7053–7065. doi: [10.1109/tgrs.2017.2739133](https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2739133).
- [2] HU Xianyang, MA Changzheng, HU Ruizhi, *et al.* Imaging for small UAV-borne FMCW SAR[J]. *Sensors*, 2018, 19(1): 87. doi: [10.3390/s19010087](https://doi.org/10.3390/s19010087).
- [3] YI Tianzhu, HE Zhihua, HE Feng, *et al.* Generalized nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR imaging[J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2568. doi: [10.3390/s17112568](https://doi.org/10.3390/s17112568).
- [4] 邢孟道, 林浩, 陈溅来, 等. 多平台合成孔径雷达成像算法综述[J]. *雷达学报*, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
XING Mengdao, LIN Hao, CHEN Jianlai, *et al.* A review of imaging algorithms in multi-platform-borne synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(6): 732–757. doi: [10.12000/JR19102](https://doi.org/10.12000/JR19102).
- [5] BERIZZI F, MARTORELLA M, CACCIAMANO A, *et al.* A contrast-based algorithm for synthetic range-profile motion compensation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3053–3062. doi: [10.1109/TGRS.2008.2002576](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002576).
- [6] MANCILL C E and SWIGER J M. A map drift autofocus technique for correcting higher order SAR phase error[C].

- 27th Annual Tri-Service Radar Symposium Record, Monterey, USA, 1981: 391–400.
- [7] HUANG Yan, LIU Feiyang, CHEN Zhanye, *et al.* An improved map-drift algorithm for unmanned aerial vehicle SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(11): 1–5. doi: [10.1109/LGRS.2020.3011973](https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3011973).
- [8] XING Mengdao, JIANG Xiwei, WU Renbiao, *et al.* Motion compensation for UAV SAR based on raw radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(8): 2870–2883. doi: [10.1109/TGRS.2009.2015657](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2015657).
- [9] DE MACEDO K A C, SCHEIBER R, and MOREIRA A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3151–3162. doi: [10.1109/TGRS.2008.924004](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.924004).
- [10] ZHANG Lei, SHENG Jialian, XING Mengdao, *et al.* Wavenumber-domain autofocus for highly squinted UAV SAR imagery[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(5): 1574–1588. doi: [10.1109/JSEN.2011.2175216](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2175216).
- [11] ZHANG Lei, QIAO Zhijun, XING Mengdao, *et al.* A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(8): 3202–3218. doi: [10.1109/TGRS.2011.2180392](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2180392).
- [12] XIONG Tao, XING Mengdao, WANG Yong, *et al.* Minimum-entropy-based autofocus algorithm for SAR data using chebyshev approximation and method of series reversion, and its implementation in a data processor[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1719–1728. doi: [10.1109/tgrs.2013.2253781](https://doi.org/10.1109/tgrs.2013.2253781).
- [13] SU Y A, LIU Weixian, FENG Hongchuan, *et al.* Study of multi-rotor UAV SAR processing[C]. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), Seattle, USA, 2017: 226–232. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944202](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944202).
- [14] 邢涛, 胡庆荣, 李军, 等. 机载毫米波SAR垂直航向运动补偿分析与比较[J]. *火控雷达技术*, 2016, 45(1): 13–22. doi: [10.3969/j.issn.1008-8652.2016.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8652.2016.01.003).
- XING Tao, HU Qingrong, LI Jun, *et al.* Analysis and comparison of airborne MMW SAR vertical course motion compensation[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2016, 45(1): 13–22. doi: [10.3969/j.issn.1008-8652.2016.01.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-8652.2016.01.003).
- [15] 黎涛, 付耀文, 张健丰, 等. 多旋翼无人机载SAR视线向运动误差补偿方法[J]. *信号处理*, 2022, 38(3): 491–501. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.03.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.03.006).
- LI Tao, FU Yaowen, ZHANG Jianfeng, *et al.* A method of line-of-sight motion error compensation for multi-rotor UAV SAR[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(3): 491–501. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.03.006](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.03.006).
- [16] 邢涛, 李军, 胡庆荣, 等. 毫米波小斜视SAR垂直航向运动分析与补偿[J]. *西安电子科技大学学报*, 2016, 43(1): 127–132. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2016.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2016.01.023).
- XING Tao, LI Jun, HU Qingrong, *et al.* Cross-track motion analysis and compensation of millimeter wave small squint SAR[J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(1): 127–132. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2016.01.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2016.01.023).
- [17] SU Hao, WEI Shunjun, ZHANG Xiaoling, *et al.* Efficient autofocus of small multi-rotor UAV SAR by minimum entropy BP algorithm[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(21): 7356–7359. doi: [10.1049/joe.2019.0625](https://doi.org/10.1049/joe.2019.0625).
- [18] BEZVESILNIY O O, GOROVYI I M, and VAVRIV D M. Autofocusing SAR images via local estimates of flight trajectory[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2016, 8(6): 881–889. doi: [10.1017/S1759078716000180](https://doi.org/10.1017/S1759078716000180).
- [19] SHEN Wei, HE Xueli, MAO Xinhua, *et al.* An autofocus algorithm for multi-rotor UAV SAR[C]. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, Thailand, 2017: 1–2. doi: [10.1109/ISANP.2017.8228781](https://doi.org/10.1109/ISANP.2017.8228781).
- [20] FORNARO G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(3): 997–1009. doi: [10.1109/7.784069](https://doi.org/10.1109/7.784069).
- [21] GU Chengfei, CHANG Wenge, LI Xiangyang, *et al.* A new distortion correction method for FMCW SAR real-time imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(3): 429–433. doi: [10.1109/LGRS.2017.2647962](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2647962).
- [22] 曾朝阳, 王辉. W波段UAV MISAR实时成像运动补偿方法[J]. *上海航天(中英文)*, 2020, 37(1): 63–69, 100. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.009](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.009).
- ZENG Zhaoyang and WANG Hui. The motion compensation method for W-band UAV MISAR real-time imaging[J]. *Aerospace Shanghai (Chinese & English)*, 2020, 37(1): 63–69, 100. doi: [10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.009](https://doi.org/10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.01.009).
- [23] 贾高伟, 常文革. 高分辨率UAV SAR的三维运动误差分离与补偿[J]. *国防科技大学学报*, 2014, 36(4): 71–76. doi: [10.11887/j.cn.201404013](https://doi.org/10.11887/j.cn.201404013).
- JIA Gaowei and CHANG Wenge. Three-dimensional motion error correction for unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2014, 36(4): 71–76. doi: [10.11887/j.cn.201404013](https://doi.org/10.11887/j.cn.201404013).
- [24] CARIS M, STANKO S, PALM S, *et al.* Synthetic aperture radar at millimeter wavelength for UAV surveillance applications[C]. 2015 IEEE 1st International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI), Turin, Italy, 2015: 349–352. doi: [10.1109/RTSI.2015.7325145](https://doi.org/10.1109/RTSI.2015.7325145).
- [25] STANKO S, JOHANNES W, SOMMER R, *et al.*

- Millimeterwave radar for SAR on UAVs with real-time image display[C]. 2011 12th International Radar Symposium (IRS), Leipzig, Germany, 2011: 507–511.
- [26] SUN B M, KENNEY R H, YEARY M B, *et al.* An up-sampled particle filter fusion technique and its application in synthetic aperture radar imaging[J]. *IEEE Journal of Microwaves*, 2022, 2(1): 108–122. doi: [10.1109/JMW.2021.3123531](https://doi.org/10.1109/JMW.2021.3123531).
- [27] 张雨轮, 张涛, 李涛, 等. 基于惯导的机载斜视SAR运动补偿研究[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(1): 18–21, 41. doi: [10.19472/j.cnki.1008-8652.2014.01.005](https://doi.org/10.19472/j.cnki.1008-8652.2014.01.005).
- ZHANG Yulun, ZHANG Tao, LI Tao, *et al.* Study on IMU based motion compensation for airborne squint SAR[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2014, 43(1): 18–21, 41. doi: [10.19472/j.cnki.1008-8652.2014.01.005](https://doi.org/10.19472/j.cnki.1008-8652.2014.01.005).
- [28] LIANG Yujie, LIANG Yi, ZHANG Gang, *et al.* A modified design method of pulse repetition frequency for synthetic aperture radar system based on the single point equivalent squint model[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2021, 15(7): 748–759. doi: [10.1049/rsn2.12081](https://doi.org/10.1049/rsn2.12081).
- [29] TSUNODA S I, PACE F, STENCE J, *et al.* Lynx: A high-resolution synthetic aperture radar[C]. Proceedings of SPIE 3704, Radar Sensor Technology IV, Orlando, USA, 1999: 20–27. doi: [10.1117/12.354602](https://doi.org/10.1117/12.354602).
- [30] 李建阳, 常文革, 李悦丽. UWB SAR实时PRF调整[J]. *现代雷达*, 2009, 31(4): 34–37. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2009.04.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2009.04.008).
- LI Jianyang, CHANG Wenge, and LI Yueli. Real time adjustment of PRF in UWB SAR[J]. *Modern Radar*, 2009, 31(4): 34–37. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2009.04.008](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2009.04.008).
- [31] LIANG Yi, LI Guofei, ZHANG Gang, *et al.* A nonparametric paired echo suppression method for helicopter-borne SAR imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(12): 2080–2084. doi: [10.1109/LGRS.2019.2962175](https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2962175).
- [32] KLAUDER J R, PRICE A C, DARLINGTON S, *et al.* The theory and design of chirp radars[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1960, 39(4): 745–808. doi: [10.1002/j.1538-7305.1960.tb03942.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1960.tb03942.x).
- [33] 张澄波. 合孔径雷达: 原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 140–152.
- ZHANG Chengbo. Synthetic Aperture Radar: Principles, System Analyses, Applications[M]. Beijing: Science Press, 1989: 140–152.
- [34] 沈永欢, 梁在中, 许履瑚, 等. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 668–672.
- SHEN Yonghuan, LIANG Zaizhong, XU Lvhu, *et al.* Handbook of Practical Mathematics[M]. Beijing: Science Press, 1992: 668–672.
- [35] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood: Artech House, 2005: 60.

作者简介

李悦丽, 博士, 教授, 主要研究方向为空载雷达合成孔径成像、前视成像以及射频干扰抑制技术。

李泽森, 硕士生, 研究方向为雷达智能感知与处理。

王 建, 博士, 讲师, 主要研究方向为新体制雷达系统与智能信息处理技术。

刘 可, 硕士生, 研究方向为雷达智能感知与处理。

周智敏, 博士, 教授, 主要研究方向为新体制雷达技术。

(责任编辑: 高华)