

逆合成孔径激光雷达相位误差补偿算法

阮航 吴彦鸿 叶伟 贾鑫

(装备学院光电装备系, 北京 101416)

摘要 由于发射信号波长极短,目标或平台的微小振动将严重影响逆合成孔径激光雷达(ISAL)的成像效果。同时受激光调制技术的限制,ISAL发射脉冲信号的初始相位存在随机相位误差,这也对ISAL成像造成了极大的影响。现有的相位梯度自聚焦(PGA)算法无法补偿高频振动产生的相位误差;由于目标相对雷达转动分量的影响,空间相关算法(SCA)对补偿上述ISAL中的相位误差效果有限。为解决上述问题,将PGA算法与SCA方法相结合,提出了PGA-SCA相位补偿算法,通过循环移位和加窗处理消除了相邻回波间目标转动的影响。仿真结果表明,PGA-SCA能有效补偿上述两种相位误差,并获得聚焦良好的ISAL图像。

关键词 遥感;逆合成孔径激光雷达;振动;随机相位误差;相位梯度自聚焦;空间相关算法

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.102801

Algorithm of Phase Error Compensation for Inverse Synthetic Aperture Ladar

Ruan Hang Wu Yanhong Ye Wei Jia Xin

(Department of Optical and Electronic Equipment, The Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract Since the transmitted signal of inverse synthetic aperture ladar (ISAL) has a very short wavelength, even the weak vibration of the target or the platform will seriously corrupt the ISAL image. In addition, existence of random phase error of the initial phases of the transmitted pulses of ISAL will greatly degrade ISAL images due to the limitation of the laser modulation technology, which also results in a defocused image of ISAL. The phase gradient autofocus (PGA) algorithm fails to compensate the phase errors induced by a high-frequency vibration; meanwhile, the spatial correlation algorithm (SCA) has a limited function on compensating the phase errors because of the relative rotation between the target and ISAL. Combining PGA and SCA, a new phase error compensation algorithm, which can be named PGA-SCA, is proposed. The effect of the relative rotation is eliminated by a circular shifting and windowing operation. Simulation results show that, the proposed algorithm is effective in correcting the phase errors and capable to generate a well-focused ISAL image.

Key words remote sensing; inverse synthetic aperture ladar; vibration; random phase error; phase gradient autofocus; spatial correlation algorithm

OCIS codes 280.6730; 280.4750; 030.1640; 050.1960; 120.7280

1 引言

光波波段合成孔径雷达(SAL)二维分辨率在距离上具有良好的一致性,是理论上可以在数千千米距离上实现厘米级分辨率的唯一光学手段^[1],因此也受到了越来越广泛的关注。2002年美国海军实验室实现了世界上第1个扫描式二维SAL系统^[2]。2011年洛克希德·马丁公司展示了世界上首幅室外机载SAL图像^[3]。中国科学院上海光学精密机械研究所和西安电子科技大学在该方面也分别开展了相关理论和实验研

收稿日期: 2013-05-16; **收到修改稿日期**: 2013-05-22; **网络出版日期**: 2013-08-20

作者简介: 阮航(1987—),男,博士研究生,主要从事逆合成孔径激光雷达成像方面的研究。

E-mail: dragonhang9@163.com

导师简介: 吴彦鸿(1971—),男,教授,博士生导师,主要从事信息获取与处理、信息对抗等方面的研究。

E-mail: mail2wyh@163.com

究,并取得了重要进展^[4-5]。

利用逆合成孔径激光雷达(ISAL)可获得非合作目标的高分辨二维图像,在军事和民用上具有广泛的应用前景。然而,由于 ISAL 采用激光作为发射信号,其波长在微米量级,目标或雷达平台在成像过程中的微小机械振动会引入不可忽视的相位误差,从而造成 ISAL 无法正常成像。此外,受激光调制技术的限制,ISAL 发射激光脉冲信号的初始相位也存在随机误差,难以满足 ISAL 成像的相干性要求,这大大限制了 ISAL 的发展和应用。

针对上述问题,已有一些文献研究了振动及初始相位随机误差对 ISAL 成像的影响^[6-9],指出上述误差只对 ISAL 方位成像存在影响。此外,文献[10]提出了一种实包络 ISAL 成像算法,虽然在非相干情况下也能成像,但却以牺牲方位分辨率为代价。文献[9]指出传统的相位梯度自聚焦算法(PGA)对校正上述相位误差存在很大的局限性,只能补偿低频的相位误差,对高频相位误差则无效。文献[11]建议在 SAL 成像中采用基于最大似然估计法的单程 PGA 算法补偿相位误差,但需要足够高的脉冲重复频率(PRF)以保证相邻脉冲间良好的相关性。文献[12]指出,由于激光波长极短,传统的惯性导航系统(INS)或惯性测量单元(IMU)对运动误差的测量精度有限,远不能满足 SAL 成像的需求。为此,文献[12]提出采用基于回波数据的空间相关法(SCA)补偿平台微弱振动引入的相位误差,文献[9]仿真验证了 SCA 法在 SAL 成像中的有效性。SCA 法与单程 PGA 法本质上是一样的,同样也需要足够高的 PRF 保证相邻脉冲间良好的空间相关性。

在 SAL 成像中,一方面可使用 INS/IMU 直接测量运动误差,实现对相位误差的粗补偿,同时也可通过控制平台运动速度及适当提高发射信号 PRF 来保证回波信号间足够的空间相关性,继而采用单程 PGA 法或 SCA 法等基于回波数据的方法来实现对相位误差的精确补偿。然而 ISAL 成像中主要针对的是非合作目标,只能采用基于回波数据的方法补偿相位误差,且通常满足相邻回波脉冲间空间相关性所需的 PRF 极高,现有的激光器件无法实现。因而 SAL 中的上述相位误差补偿算法并不适用于 ISAL 中。为此,本文将 PGA 与 SCA 结合,提出一种 PGA-SCA 法应用于 ISAL 成像中,对于目标平动、振动引入的相位误差以及发射脉冲初始相位随机误差都有很好的补偿效果。仿真实验验证了上述方法的有效性。

2 PGA-SCA 算法

2.1 SCA 法校正相位误差

图 1 所示为 ISAL 成像几何关系,其中 XOY 为固定于目标上的直角坐标系, O 为目标质心。假设 $R(t)$ 为目标质心点 O 在时刻 t 到雷达的距离,称为平动分量,对目标上所有散射点都是一致的,因此对方位成像没有贡献,需要在成像中补偿掉。同时,目标绕质心 O 按逆时针转动,角速度为 ω ,称为转动分量。在此,可将成像区域划分为 N 个距离单元,第 n 个距离单元的纵坐标可表示为 y_n 。在第 n 个距离单元沿 X 轴分布着 M 个散射点,其坐标为 (x_m, y_n) ,散射点强度为 σ_{nm} 。

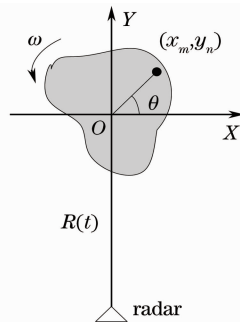


图 1 ISAL 成像几何关系

Fig. 1 ISAL imaging geometry

为便于讨论,在此假设包络对齐已完成。在满足平面波近似的条件下,在方位采样时刻 t_k 距离单元 y_n 处的回波信号可表示为

$$s_{n,k} = \sum_{m=1}^M \sigma_{nm} \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_k + y_n) \right] \exp(j\delta_k), \quad (1)$$

式中 λ 为发射信号波长, $R_k = R(t_k)$, $\exp(j\delta_k)$ 为目标振动引入的相位误差与发射脉冲初始相位随机误差的总和。

在与 t_k 时刻相邻的下一方位采样时刻 t_{k+1} , 目标相对雷达视线已转过 $\Delta\theta$ 角度, 假设距离单元 y_n 内点目标不变, 此时距离单元 y_n 处的回波信号可表示为

$$\begin{aligned} s_{n,k+1} &= \sum_{m=1}^M \sigma_{nm} \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_{k+1} + y_n \cos \Delta\theta + x_m \sin \Delta\theta)\right] \exp(j\delta_{k+1}) = \\ &= \sum_{m=1}^M \sigma_{nm} \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_k + y_n)\right] \exp(j\delta_k) \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta R_{k+1} + \Delta r_{n,m})\right] \exp(j\Delta\delta_{k+1}) = \\ &= \sum_{m=1}^M \sigma_{nm} \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_k + y_n)\right] \exp(j\delta_k) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{n,m}\right) \exp(j\Delta\delta'_{k+1}), \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\Delta R_{k+1} = R_{k+1} - R_k$ 为相邻回波脉冲的平动分量差, 对目标上所有散射点都一致; $\Delta r_{n,m} = y_n \cos \Delta\theta + x_m \sin \Delta\theta - y_n$ 为转动分量差, 与散射点的坐标值有关, 是方位高分辨成像的基础; $\Delta\delta_{k+1} = \delta_{k+1} - \delta_k$, $\Delta\delta'_{k+1} = \delta'_{k+1} - \delta'_k = \Delta\delta_{k+1} - 4\pi\Delta R_{k+1}/\lambda$ 。

当忽略转动分量的影响时, 即当 $\Delta r_{n,m} = 0$ 时, 可将(2)式重写为

$$s_{n,k+1} = s_{n,k} \exp(j\Delta\delta'_{k+1}). \quad (3)$$

利用 SCA 法进行相位误差补偿, 首先是通过相邻脉冲回波信号做相关, 得到空间相关函数 $G_{k,k+1}$:

$$G_{k,k+1} = E(s_k s_{k+1}^*) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_{n,k} s_{n,k+1}^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |s_{n,k}|^2 \exp(-j\Delta\delta'_{k+1}) = |G_{k,k+1}| \exp(-j\Delta\delta'_{k+1}), \quad (4)$$

式中 s_k 为方位采样时刻 t_k 获取的第 k 个回波脉冲。

利用文献[12]中方法可以求得空间相关函数相位的最大似然估计值, 并求取第 k 个回波脉冲的总相位偏移量:

$$\Delta\delta'_{k+1} \approx -\arg\{G_{k,k+1}\}, \quad (5)$$

$$\psi_k = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\delta'_{i+1} = \delta'_k - \delta'_1. \quad (6)$$

用(6)式中获得的相位偏移量对回波相位进行校正, 从而可实现相位误差补偿。

(5)式相位误差估计过程中忽略了转动相位分量的影响, 保证了良好的回波脉冲间空间相关性。实际当中 ISAL 大多对非合作目标成像, ISAL 发射相邻脉冲时间内目标相对雷达有一定的转角, 此时若仍采用 SCA 法进行补偿, 效果将并不理想。

在 ISAL 成像中, 对于相邻脉冲时间差 $\Delta t_{k+1} = t_{k+1} - t_k$, 若满足小角度近似, 即有

$$\begin{cases} \cos \Delta\theta = \cos \omega \Delta t_{k+1} \approx 1 \\ \sin \Delta\theta = \sin \omega \Delta t_{k+1} \approx \omega \Delta t_{k+1} \end{cases}, \quad (7)$$

则转动分量 Δr_n 为

$$\Delta r_n = y_n \cos \Delta\theta + x_m \sin \Delta\theta - y_n \approx x_m \omega \Delta t_{k+1}. \quad (8)$$

因此, (2)式可重写为

$$s_{n,k+1} = \sum_{m=1}^M \sigma_{nm} \exp\left[-j \frac{4\pi}{\lambda} (R_k + y_n)\right] \exp(j\delta_k) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} x_m \omega \Delta t_{k+1}\right) \exp(j\Delta\delta'_{k+1}). \quad (9)$$

此时, 对应的空间相关函数为

$$\begin{aligned} G_{k,k+1} &= E(s_k s_{k+1}^*) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_{n,k} s_{n,k+1}^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M |\sigma_{nm}|^2 \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} x_m \omega \Delta t_{k+1}\right) \exp(-j\Delta\delta'_{k+1}) + \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M \sigma_{ni} \sigma_{nj}^* \exp\left(j \frac{4\pi}{\lambda} x_j \omega \Delta t_{k+1}\right) \exp(-j\Delta\delta'_{k+1}). \end{aligned} \quad (10)$$

在(10)式中, 第一项和第二项都含有误差相位项 $\exp(-j\Delta\delta'_{k+1})$, 但同时还都存在由于目标转动引入的相位项, 此时用(5)式和(6)式估计出的相位并不完全代表实际的相位误差, 在补偿后仍会存在残留相位误差, 因此该算法在 ISAL 中的补偿效果并不十分理想。

为解决上述问题, 在此将 PGA 算法与 SCA 算法相结合, 提出一种 PGA-SCA 的相位误差补偿算法。

2.2 PGA-SCA 法

PGA 算法的思想可以概括为移位、加窗、相位误差估计及校正^[13]。其中,移位是将各距离单元中的最强点循环移位至图像的中心(即零多普勒频移处),此时可消除转动相位分量的影响。加窗则是将特显点隔离出来,既要保存特显点的信息,又必须将其他散射点形成的干扰信号尽可能去除。

因此,为了消除(10)式中转动相位分量 $\exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}x\omega\Delta t_{k+1}\right)$ 的影响,提高对相位误差估计的准确度,我们将 PGA 中的循环移位、加窗操作与 SCA 法相结合,提出一种 PGA-SCA 相位误差补偿算法,在消除转动相位分量影响的情况下,再采用 SCA 法进行误差估计和补偿,以适应 ISAL 成像的需要。

在 SCA 算法的基础上,PGA-SCA 相位补偿算法的实现过程如下:

1) 对包络对齐后的数据域回波信号,采用 SCA 法进行相位补偿,并利用傅里叶变换进行方位压缩获取目标初像,由(9)式可得此时距离单元 y_n 处的回波信号可表示为

$$s_n(t) = \sum_{m=1}^M \sigma_{mm} \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}y_n\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}x_m\omega t\right) \exp[j\hat{\delta}(t)], \quad (11)$$

式中 t 为方位慢时间,且 $t = t_0, t_1, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots$; $\exp[j\hat{\delta}(t)]$ 为补偿后图像的残留相位误差。

2) 在目标像的每个距离单元中,选取能量最强点并通过循环移位,将其置于图像中心(零多普勒频移处),以消除转动相位分量对该点的影响,该过程表示为

$$s_n(t) = \sum_{m=1}^M \sigma_{mm} \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}x_m\omega t\right) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}y_n\right) \exp[j\hat{\delta}(t)] \exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}x_i \sin \omega t\right) = \left\{ \sigma_m + \sum_{m=1}^{M, m \neq i} \sigma_{mm} \exp\left[j\frac{4\pi}{\lambda}(x_i - x_m)\omega t\right] \right\} \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}y_n\right) \exp[j\hat{\delta}(t)], \quad (12)$$

式中 σ_m 为第 n 个距离单元内最强点的散射系数。

3) 构造窗函数,隔离出循环移位后位于图像中心的特显点,并变换至数据域,此时每个距离单元中只包含有最强点的回波信号及噪声:

$$\hat{s}_n(t) = \sigma_m \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}y_n\right) \exp[j\hat{\delta}(t)] + e_n(t), \quad (13)$$

式中 $e_n(t)$ 为加窗隔离后在数据域存在的噪声。

4) 将步骤 3) 中获得的数据,按照步骤 1) 再次进行相位误差补偿,此时空间相关函数 $\hat{G}_{k,k+1}$ 为

$$\hat{G}_{k,k+1} = E[\hat{s}(t_k)\hat{s}^*(t_{k+1})] \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{s}_{n,k} \hat{s}_{n,k+1}^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\sigma_m|^2 \exp(-j\Delta\hat{\delta}_{k+1}) = |\hat{G}_{k,k+1}| \exp(-j\Delta\hat{\delta}_{k+1}), \quad (14)$$

式中 $\Delta\hat{\delta}_{k+1} = \hat{\delta}_{k+1} - \hat{\delta}_k$, $|\hat{G}_{k,k+1}| = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\sigma_m|^2$ 。

因此,可求得第 k 个回波脉冲的总相位偏移量为

$$\Delta\hat{\delta}_{k+1} \approx -\arg\{\hat{G}_{k,k+1}\}, \quad (15)$$

$$\hat{\psi}_k = \sum_{i=1}^{k-1} \Delta\hat{\delta}_{i+1} = \hat{\delta}_k - \hat{\delta}_1. \quad (16)$$

经过几次迭代,即可获得聚焦良好的 ISAL 像。

考虑到当相位误差较为严重时,在方位成像后图像中目标点严重散焦,将不利于步骤 2) 和步骤 3) 中处理,因而在步骤 1) 中先利用 SCA 法对相位误差进行粗略补偿,以改善初像质量。在步骤 3) 中,窗函数长度的选取对于算法的性能有较大影响。如果窗长取得太大,干扰信号的残留就多,影响了对相位误差的估计;如果窗长取得太小,特显点的信息就会丢失,同样不利于相位误差的准确估计。在文献^[13]中对窗长的取值有较为详细的讨论,在此不再赘述。

3 仿真实验

为验证本文所提出方法的有效性,在此进行了计算机仿真验证实验。仿真参数设定如下:雷达离目标初始距离 20 km, ISAL 发射波长 1.55 μm , 带宽 150 GHz, 脉宽 100 μs , 距离向采样点数为 256, 成像时间

0.2 s, 脉冲重复频率 2000 Hz, 目标的径向运动速度为 100 m/s, 目标相对转动角速度为 0.005 rad/s。仿真中目标为飞机模型, 如图 2 所示。

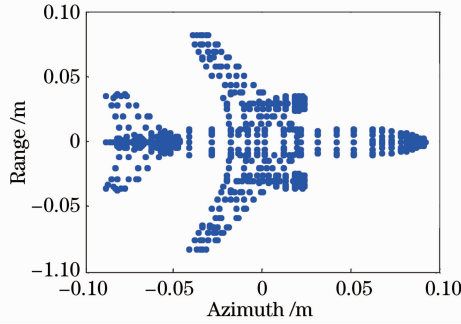


图 2 目标模型

Fig. 2 Target model

3.1 对振动相位误差的补偿性能

通过仿真对比分析了 PGA、SCA 和 PGA-SCA 补偿振动相位误差的性能。其中, PGA 和 PGA-SCA 的初始窗长取为方位采样点数的一半, 之后每次迭代递减 20%^[13]。仿真中在图 1 中 Y 轴方向添加了目标振动, 并将其视为一正弦信号^[6-8], 沿用文献[8]中的命名格式, 例如 1_50_40, 表示振幅为 1 mm, 频率为 50 Hz, 初相为 40°。

首先仿真了上述三种方法补偿低频振动的结果。图 3 所示为当目标振动参数设为 1_0.1_90 时的 ISAL 成像结果。其中, 图 3(a) 为未补偿振动相位误差时的 ISAL 图像, 由于振动相位误差的影响, 图中目标上散射点在方位向出现了散焦。图 3(b) 为采用 PGA 算法进行补偿后的成像结果, 可见 PGA 算法对低频振动有较好的补偿性能, 目标在方位向聚焦良好。图 3(c) 为 SCA 补偿后的成像结果, 由于在估计相位误差过程中存在转动相位分量的干扰, 该方法不仅未能准确估计相位误差, 反而引入了更大的误差, 目标已无法辨识。图 3(d) 为采用本文方法补偿获取的结果, 图中目标聚焦良好, 说明本方法能够有效补偿低频振动相位误差。

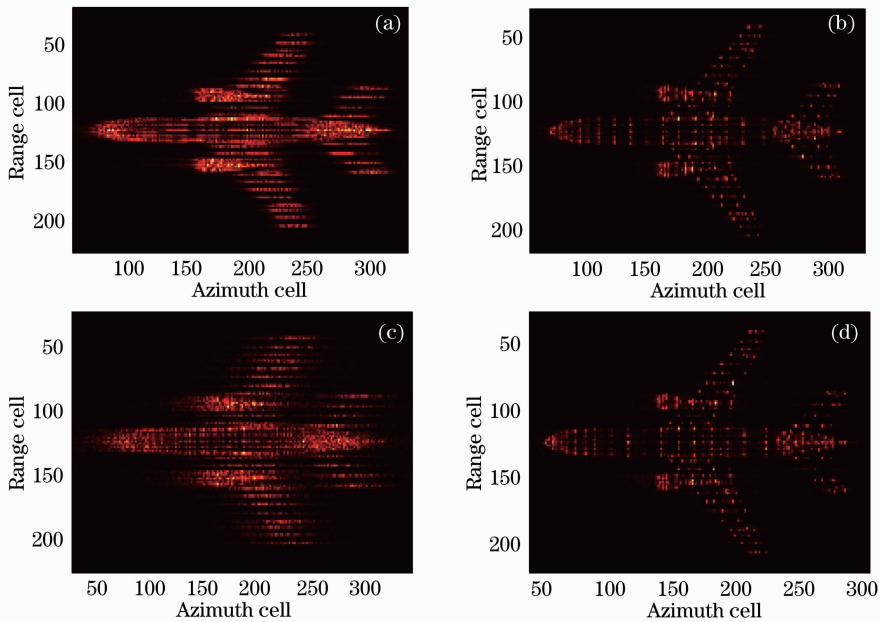


图 3 补偿低频振动后的 ISAL 图像。(a) 振动参数为 1_0.1_90 时图像; (b) PGA 补偿后图像; (c) SCA 补偿后图像; (d) PGA-SCA 补偿后图像

Fig. 3 ISAL images with the low-frequency vibration being compensated. (a) Image with vibrational parameter 1_0.1_90; (b) image corrected using PGA; (c) image corrected using SCA; (d) image corrected using PGA-SCA

其次,我们对高频振动相位误差的补偿也进行了仿真,结果如图4所示。其中,图4(a)为未补偿相位误差时的结果。图4(b)为PGA的补偿结果,补偿后的图像存在严重的散焦,说明PGA算法无法补偿高频振动,这与文献[9]中的结果是一致的。图4(c)为SCA的补偿结果,由于转动分量的存在影响了相位误差的估计,使得SCA的补偿效果并不好。图4(d)为PGA-SCA的补偿结果,图中目标上散射点十分清晰,说明本方法对高频振动相位误差也能有效补偿。

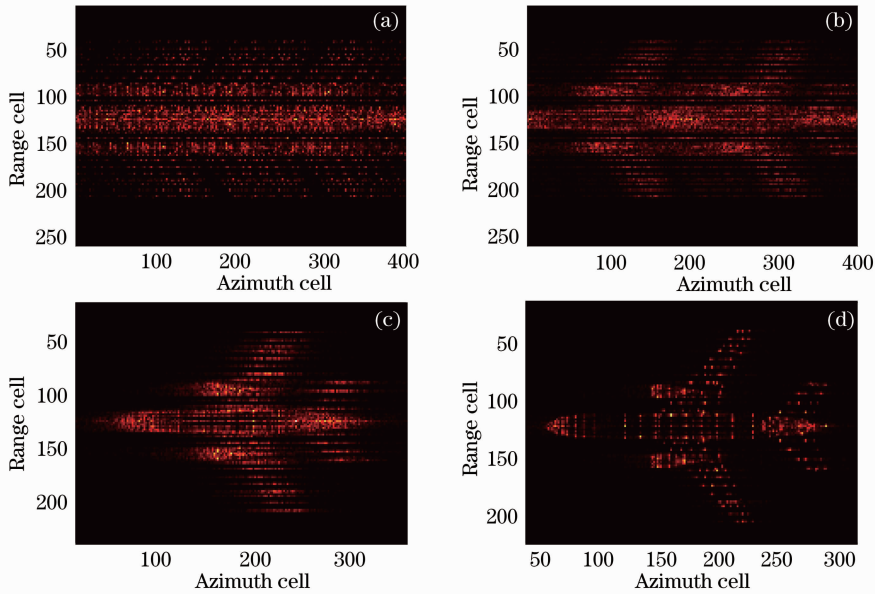


图4 补偿高频振动后的ISAL图像。(a)振动参数为1_100_90时图像;(b)PGA补偿后图像;(c)SCA补偿后图像;(d)PGA-SCA补偿后图像

Fig. 4 ISAL images with the high-frequency vibration being compensated. (a) Image with vibrational parameter 1_100_90; (b) image corrected using PGA; (c) image corrected using SCA; (d) image corrected using PGA-SCA

3.2 对随机相位误差的补偿性能

对于ISAL发射脉冲信号初始相位存在的随机误差,仿真分析了三种方法对它们的补偿性能。仿真中采用高斯型随机相位误差,用随机相位的均方根 σ 表征误差的强弱。图5所示为 $\sigma=2\pi$ 的随机相位误差对ISAL图像干扰的结果。图6所示为三种方法补偿相位误差后的结果。对比图6中结果可见,PGA算法补偿随机相位误差的效果不理想;SCA算法受转动相位分量的影响,补偿性能也十分有限;而经PGA-SCA法补偿后可获得聚焦良好的图像,效果十分理想。

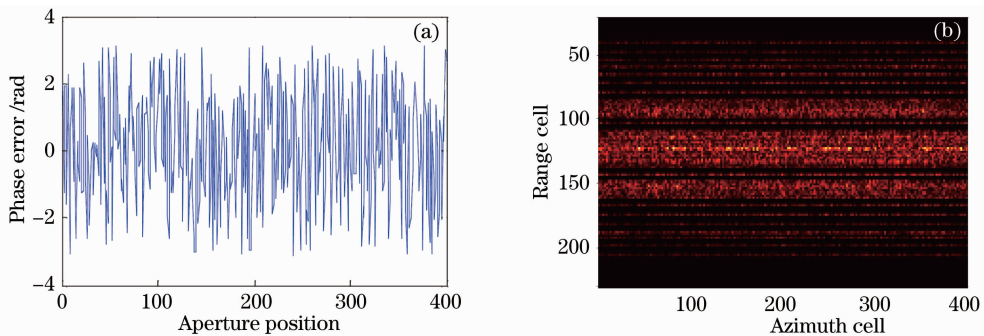


图5 随机相位误差干扰后的ISAL成像结果。(a)随机相位误差;(b)受干扰的图像

Fig. 5 ISAL image corrupted by random phase errors. (a) Random phase error; (b) corrupted image

在实际的ISAL成像当中,振动误差和随机相位误差将同时存在于回波中,为此,我们也给出了对上述情况的仿真结果,其中振动误差参数设为1_100_60,随机相位误差的 $\sigma=\pi$,仿真结果如图7所示。从图中可见,PGA-SCA算法性能优异,补偿后的图像聚焦良好,可见该方法适用于ISAL成像中的相位误差补偿。

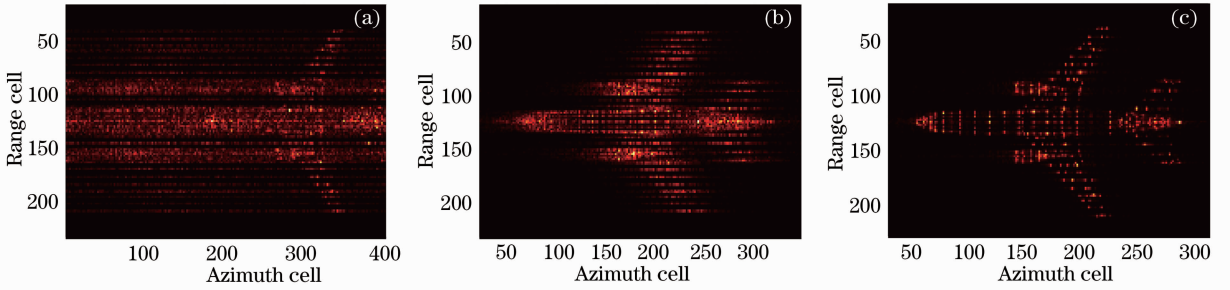


图 6 补偿随机相位误差后的 ISAL 图像。(a) PGA 补偿后图像；(b) SCA 补偿后图像；(c) PGA-SCA 补偿后图像

Fig. 6 ISAL images with the random phase errors being compensated. (a) Image corrected using PGA;

(b) image corrected using SCA; (c) image corrected using PGA-SCA

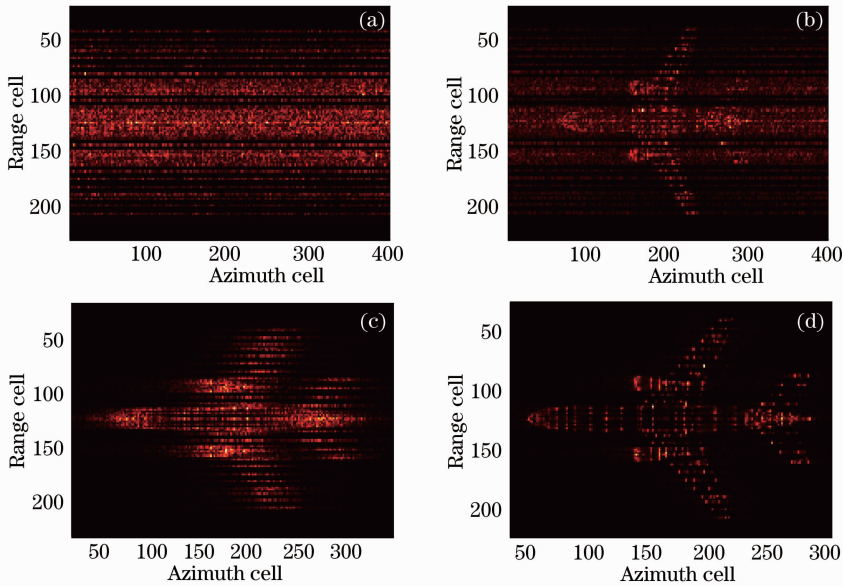


图 7 补偿振动、随机相位误差后的 ISAL 图像。(a) 受干扰的图像；(b) PGA 补偿后图像；(c) SCA 补偿后图像；(d) PGA-SCA 补偿后图像

Fig. 7 ISAL images with the vibration and random phase errors being compensated. (a) Corrupted image;

(b) image corrected using PGA; (c) image corrected using SCA; (d) image corrected using PGA-SCA

为比较上述几种方法对相位误差的补偿性能,在此利用图像熵作为评价指标。假设获取的 ISAL 图像为 $f(n,k)$, n 和 k 分别为距离向和方位向的采样单元序号。ISAL 图像的总能量为

$$F = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N |f(n,k)|^2, \quad (17)$$

则图像熵的定义为

$$E = - \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{|f(n,k)|^2}{F} \ln \frac{|f(n,k)|^2}{F}. \quad (18)$$

如果相位误差补偿越精确,图像聚焦就越好,图像熵值就越小。表 1 中给出了上述几种情况中三种算法补偿获取的图像熵结果。从表中可见,三种方法中 PGA 在低频振动时的补偿效果最好,但对高频振动的补偿效果则最差;由于转动分量的存在,SCA 算法对振动和初始相位随机误差的补偿效果一般,但补偿性能比较稳定,图像熵保持在 8.58 的水平;综合比较而言,PGA-SCA 的补偿效果最好,且补偿性能比较稳定,对于文中讨论的几种相位误差能够有效补偿,适用于 ISAL 成像。

表 1 三种相位误差补偿算法的补偿性能(图像熵值)

Table 1 Performance of the three phase-error compensation algorithms (image entropy)

| Vibration | σ | Image entropy | | | |
|-----------|----------|----------------|--------|--------|---------|
| | | Polluted image | PGA | SCA | PGA-SCA |
| 1_0_1_90 | 0 | 8.4843 | 7.2063 | 8.5877 | 7.2555 |
| 1_100_90 | 0 | 9.2879 | 9.6256 | 8.5800 | 7.3582 |
| 0 | 2π | 9.8660 | 9.5229 | 8.5872 | 7.3754 |
| 1_100_60 | π | 9.6909 | 8.9602 | 8.5819 | 7.2445 |

4 结 论

在对非合作目标成像时, ISAL 回波受目标振动和发射脉冲初始相位随机误差的双重影响, 其图像方位分辨率将严重恶化。PGA 算法对相位误差的作用频率范围有限, 无法满足 ISAL 成像的要求; SCA 方法受 ISAL 成像中转动相位分量的影响, 不能对上述相位误差进行准确估计。提出的 PGA-SCA 算法通过循环移位消除了转动相位分量的影响, 再利用 SCA 方法进行相位误差估计和补偿, 有效克服了 PGA 和 SCA 方法各自的缺点, 实现了对相位误差的有效估计和补偿。

参 考 文 献

- Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 997-1000.
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 997-1000.
- M Bashkansky, R L Lucke, E Funk, *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. Opt Lett, 2002, 27(22): 1983-1985.
- B W Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration[C]. Conference on Laser and Electro-Optics, 2011. PDPB7.
- Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900112.
刘立人, 周煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900112.
- Guo Liang, Xing Mengdao, Zeng Xiaodong, *et al.*. Inverse synthetic aperture lidar imaging of indoor real data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 637-642.
郭亮, 邢孟道, 曾晓东, 等. 室内实测数据的逆合成孔径激光雷达成像[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 637-642.
- Zhao Zhilong, Wu jin, Li Feifei, *et al.*. Calculations and simulations on vibrating targets imaging in strip-map mode synthetic aperture lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828006.
赵志龙, 吴谨, 李斐斐, 等. 条带模式合成孔径激光雷达振动目标成像的计算与仿真[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828006.
- Hong Guanglie, Guo Liang. Analysis of effects of line vibration on imaging quality of synthetic aperture lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0428001.
洪光烈, 郭亮. 线振动对合成孔径激光雷达成像的影响分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0428001.
- Li Zengju, Wu Jin, Liu Guoguo, *et al.*. Preliminary investigation on airborne SAL imaging with platform vibration[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 994-1001.
李增局, 吴谨, 刘国国, 等. 振动影响机载合成孔径激光雷达成像初步研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 994-1001.
- Zang Bo. Research of Synthetic Aperture Lidar Imaging Algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. 89-104.
臧博. 合成孔径成像激光雷达算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. 89-104.
- Zang Bo, Guo Rui, Tang Yu, *et al.*. Real envelope imaging algorithm for inverse synthetic aperture imaging lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(12): 2152-2157.
臧博, 郭睿, 唐禹, 等. 逆合成孔径成像激光雷达实包络成像算法[J]. 光子学报, 2010, 39(12): 2152-2157.
- P Gatt, D Jacob, B Bradford, *et al.*. Performance bounds of the phase gradient autofocus algorithm for synthetic aperture lidar[C]. SPIE, 2009, 7323: 73230P.
- E H Attia. Data-adaptive motion compensation for synthetic aperture LADAR[C]. 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004, 3: 1782-1787.
- D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, *et al.*. Phase gradient autofocus: a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 1994, 30(3): 827-835.